

Déterminants biologiques du système poral de Vertisols cultivés (Petites Antilles)

Conséquences sur la disponibilité de l'eau des sols pour les plantes

Y.-M. Cabidoche⁽¹⁾, P. Guillaume⁽²⁾, C. Hartmann⁽³⁾, S. Ruy⁽⁴⁾, E. Blanchart⁽³⁾, A. Albrecht⁽⁵⁾, M. Mahieu⁽⁶⁾, W. Achouak⁽⁷⁾, T. Heulin⁽⁷⁾, G. Villemin⁽⁸⁾, F. Watteau⁽⁸⁾ et G. Bellier⁽⁹⁾

- (1) INRA - CRAAG, Unité Agropédoclimatique de la Zone Caraïbe, Domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France
- (2) CIRAD - CA, Station de Roujol, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France
- (3) IRD - BOST, BP 8006, 97259 Fort-de-France cedex, Martinique, France
- (4) INRA, Unité de Science du Sol, Site Agroparc, 84 914 Avignon Cedex 9, France
- (5) IRD, ICRAF, United Nations Avenue, Gigiri, PO Box 30677, Nairobi, Kenya
- (6) Conseil Général de la Martinique (SECI), Val d'Or, 97227 Sainte-Anne, Martinique, France
- (7) LEMIR UMR163 CNRS-CEA, CEA/Cadarache, DSV-DEVM, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France.
- (8) CNRS - CPB, BP 5, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy, France
- (9) IRD - LHP, 32 Avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

Cette étude a bénéficié du soutien financier (1996-1999) de l'Action Incitative Interinstitutionnelle (AII) IRD - CIRAD - CNRS - INRA : " Biofonctionnements des sols tropicaux et gestion durable des terres ".

RÉSUMÉ

Cet article s'attache à déterminer le rôle de l'activité biologique dans la dynamique et le fonctionnement du système de porosité de Vertisols des Antilles. Les Vertisols comportent un système de porosité que l'on peut schématiser en trois compartiments, différant tant par leur géométrie que par leur mode de formation, et tous trois déformables :

- (i) la porosité matricielle (taille 0,1 à 1 μm), toujours saturée par de l'eau par ailleurs peu disponible pour les plantes, dont le volume suit la déformation du réseau des argiles,
- (ii) la porosité macro-fissurale (largeur jusqu'à 10 cm), conséquence macroscopique du retrait matriciel, délimitant des prismes larges de plusieurs décimètres; les macro-fissures jouent un rôle essentiel dans l'aération, et dans la réhumectation hétérogène en profondeur, sans fonction de réservoir,
- (iii) la porosité structurale à l'intérieur de ces prismes (taille 10 μm à 10 mm), principal réservoir d'eau disponible, créée en grande partie par l'activité biologique et modifiée par le travail du sol.

Les Vertisols étudiés à la Guadeloupe (G) ont une garniture cationique saturée par le calcium échangeable, une cohésion élevée et une dispersabilité faible des argiles; ceux de la Martinique (M) où la garniture cationique des argiles est saturée par une proportion notable de magnésium et sodium échangeables, sont plus instables.

Une méthode de mesure de la conductivité hydraulique matricielle a été mise au point; les basses valeurs mesurées sont conformes à la faible disponibilité de l'eau matricielle pour les plantes. En utilisant des transducteurs d'épaisseur THERESA, mesurant les mouvements verticaux d'un sol nu et d'un sol enherbé, vérification a été faite que l'évaporation ne peut assécher le sol en profondeur, et que

seule une extraction racinaire diffuse de l'eau peut provoquer un retrait profond. La macro-fissuration est donc étroitement contingente du prélèvement de l'eau par les racines.

La porosité structurale a été étudiée en relation avec différents modes d'usage des Vertisols, sous l'hypothèse que son organisation et sa dynamique hydrique dépendent de l'activité biologique et des réorganisations mécaniques associées à la gestion du sol. Une nouvelle méthode d'observation tridimensionnelle de la seule porosité structurale a été mise au point. Elle a permis de développer une typologie des formes de pores interconnectés, dont l'origine et les déformations sont directement interprétables. Les agrégats des sols fortement travaillés ne contiennent pas (M) ou peu (G) de pores structuraux. Ils sont séparés par des pores plans, rares en (M), complétés par des méats polyédriques et des créneaux à leur périphérie en (G). Les sols sous prairies montrent d'abondants pores structuraux tubulaires de diamètre 10-30 μm , compatibles avec une activité hyphaire d'actinomycètes, dans les horizons profonds, peu développée cependant sous irrigation (M). En surface, ces pores tubulaires sont relayés par des pores plans gaufrés qui ne se referment pas au gonflement, dont la géométrie est à rapprocher des micro-agrégats identifiés, à débris organiques figurés ou bactériens. Les sols sous prairies fertilisées (G) montrent une abondance particulière d'agréats dérivés de turricules, à faible porosité interne en écailles, séparés par des cloisons rugueuses.

Les volumes et disponibilités des réservoirs d'eau ont été évalués sur des cultures de maïs en containers. Les sols fortement travaillés ont un faible réservoir disponible, avec une forte contribution de l'eau de la porosité matricielle qui conduit le maïs à un stress hydrique précoce. Les sols sous prairies sans intrant comportent un important réservoir d'eau structurale, lié à la porosité d'origine biologique, fonctionnellement disjoint du réservoir d'eau matricielle. Sous les prairies fertilisées et irriguées, la disparition des tubes fins provoque une diminution du réservoir d'eau structurale. La part des pores interstitiels de la micro-agrégation bactérienne devra être évaluée.

Ces résultats permettent de conclure qu'il faut diminuer les travaux du sols intensifs, qui altèrent la porosité préexistante - surtout en (M) plus instable -, et les substrats et agents de la porogénèse biologique. Il faut aussi pratiquer des rotations avec des prairies, pluviales ou à irrigation discontinue. L'activité des vers de terre n'a pas d'effet direct croissant sur la disponibilité de l'eau; au delà de 40 g kg^{-1} de C, elle n'améliore pas la conductivité hydraulique matricielle, et a plutôt un effet négatif sur la porogénèse microbiologique. La gestion de cette dernière, par la manipulation de la restitution de carbone et du régime hydrique est une voie à approfondir pour la gestion durable des Vertisols.

Mots clés

Vertisols, Antilles, porosité, usage du sol, activité biologique, travail du sol, disponibilité de l'eau

SUMMARY

ROLE OF SOIL BIOTA IN BUILDING THE PORE SYSTEM OF CULTIVATED VERTISOLS (WEST INDIES).

Consequences for plant water supply

This study follows Blanchart et al. (this issue). It is focused on the effect of biological activity on the dynamics and functioning of the pore system in Vertisols from the French West Indies. The pore system of a Vertisol includes three components, of which the origin, geometry, and deformations are different (figure 1):

- (i) the matric porosity (10^{-7} to 10^{-6} m size), ever saturated, of which water corresponds to a low availability domain; its volume change follows the deformation of the clay particle network during drying or wetting.*
- (ii) the macro-crack porosity (arising 10^{-1} m wide) is the macroscopic consequence of the clay matrix shrinkage and separates several decimetre wide prisms; macro-cracks allow deep aeration and induce an heterogeneous wetting of the clay; the transitory water content at the bottom of the cracks do not takes part in the water reserve.*
- (iii) the structural porosity inside the prisms (10^{-5} to 10^{-3} m wide) represents the main available water reserve; it is mainly build by the biological activity in the lower layers and can be affected by tillage in the upper layer.*

Two Vertisol types were analysed. The CEC was saturated with calcium in Guadeloupe (G) and with magnesium and sodium in Martinique (M); consequently, the first Vertisol has higher cohesion and higher structure stability than the second.

The structural porosity has been studied in relation with sol use (figure 2), assuming that the pore organisation and the resulting water flow depend on biological activity and mechanical disturbances associated with soil management and practices.

A new method of measurement of the hydraulic conductivity of the clay matrix was devised. The low values of the hydraulic conductivity of the matrix (figure 3) explain the poor availability of matric water for plants. By using THERESA (figure 4) layer thickness measurements of a bare Vertisol and of a grass grown Vertisol (figure 6), we verified that evaporation can not dry the lower layer; drying, and then shrinkage at depth are only due to root water extraction. Macro-crack formation is therefore related to the root sink function. This makes difficult to obtain representative shrinkage measurement in lab, under drying using evaporation.

A new casting method has been devised for analysing the three-dimensional organisation of the structural pores. It allowed to propose a pore typology and its interpretation in terms of genesis and deformations (table 1).

Aggregates of heavy tilled soils contain very few (G) or no (M) structural porosity (figure 8). They are separated by planar voids which are rare (M) (pl. 1, f) or associated with inter-aggregate polyhedral voids and intra-aggregate micro-cracks (G) (pl. 1, d).

Vertisol under grassland shows a spongiform architecture of the pore casting (pl. 1, h), including abundant trans-structural cylinders, from 10 to 30 μm in diameter (G) (pl. 1, b). Those pores, which could result from the hyphal activity of actinomycetes are present in all the lower layers in (G) (pl. 1, a, e); they are less developed under irrigated grassland, overall in (M) (pl. 1, c). The natural or induced water logging is the main factor of reducing the fine biologic structural pores in the lower layers (figure 9).

In the upper layer of fertilised and irrigated grassland (pl. 1, g), crimped planar voids are dominant, the geometry of which could result from bacterial micro-aggregates or micro-aggregates containing small fragments of vegetal tissues (Blanchart et al., this issue). Those crimped planar voids remain uncompletely closed after wetting. The fine cylinders are few visible. The Vertisol under highly fertilised grassland (G) shows a large abundance of earthworm turricules, with internal very small planar voids, which are separated by crimped planar voids. This is related with the high abundance of earthworms (Blanchart et al., this issue)

Volume and availability of the water reserve corresponding to several structural pore organisation were measured in container trials using maize root extraction and grow (figure 7). Heavy tilled Vertisol exhibited a low water availability, a high matric consumption associated with an early water stress on plants. No-input grassland Vertisols exhibited a large structural reserve, disconnected from the matric reserve. The high earthworm activity in Vertisol under fertilised and irrigated grassland had no effect on increasing the matric hydraulic conductivity (figure 5); the loss of fine tubular pores indicated a decrease of the structural reserve. Both indicated a negative effect of high earthworm activity on the availability of water in the upper layer. The effect of the bacterial micro-aggregation has not yet been evaluated.

As structural pore bio-genesis is related with the water availability for plants, it is necessary to reduce the frequency and depth of tillage, which affect both resources and agents of the biological activity, overall on Mg-Na unstable Vertisols (figure 8). Crop successions have to include dry or not continuously irrigated grassland. Above 40 g kg^{-1} organic carbon, the intense activity of earthworms has a negative effect on hyphal pore formation and then reduces the water availability of the upper layer. The management of the impact of microbial activity on pore formation, which depends on carbon recycling and water status on soil, appears to be a key for the optimisation of the water management in Vertisols.

Key-words

Vertisol, West-Indies, porosity, land use, biological activity, tillage, water supply

RESUMEN

DETERMINANTES BIOLÓGICOS DEL SISTEMA PORAL DE VERTISOLES CULTIVADOS (PEQUEÑAS ANTILLAS)

Consecuencias sobre la disponibilidad en agua de los suelos para las plantas

Este artículo trata de determinar el papel de la actividad biológica en la dinámica y en el funcionamiento del sistema de porosidad de vertisoles de las Antillas. Los vertisoles tienen un sistema de porosidad que se puede esquematizar en tres compartimientos, que son diferentes tanto por su geometría como por su modo de formación, y los tres deformables:

- (i) la porosidad matricial (tamaño 0,1 a 1 μm), siempre saturada por agua poco disponible para las plantas, cuyo volumen sigue la deformación de la red de arcillas,
- (ii) la porosidad de macro-fisuras (grosor hasta 10 cm), consecuencia macroscópica de la contracción matricial que delimita prismas anchos de varios decímetros; las macro-fisuras juegan un papel esencial en la aeración, y en la rehumectación heterogénea en profundidad, sin función de reserva,
- (iii) la porosidad estructural al interior de estos prismas (tamaño de 10 μm a 10 mm.), reserva principal disponible, creada en gran parte por la actividad biológica y modificada por el laboreo del suelo.

Los vertisoles estudiados en Guadalupe (G) tienen una capacidad catiónica saturada por el calcio intercambiable, una cohesión elevada, y un ligero riesgo de dispersión de las arcillas; los de Martinica (M) donde la capacidad catiónica de las arcillas es saturada por un porcentaje notable de magnesio y sodio intercambiables, son más inestables.

Un método de medición de la conductividad hidráulica matricial fue probado; los pequeños valores medidos son conformes a la pequeña disponibilidad del agua matricial para las plantas. Usando traductores de espesor THERESA, que miden movimientos verticales en suelo desnudo y en suelo enhierbado, verificación fue hecha que la evaporación no puede secar el suelo en profundidad y

que solo una extracción radicular difusa puede provocar una contracción profunda. La macro-fisuración es estrechamente ligada al uso del agua por las raíces.

La porosidad estructural se estudio con relación a los diferentes modos de uso de los vertisoles, con hipótesis que su organización y su dinámica hídrica dependen de la actividad biológica y de las reorganizaciones mecánicas asociadas al manejo del suelo. Un nuevo método de observación tridimensional de la porosidad estructural fue probado. Permite de desarrollar una tipología de formas de poros interconectados, cuyo origen y deformaciones son directamente interpretables. Los agregados de suelos fuertemente trabajados no contienen (M) o poco (G) poros estructurales. Están separados por poros planos, raros en (M), completados por méalos poliédricos y almenas a su periferia en (G). Los suelos con pastos muestran abundantes poros trans-estructurales tubulares de diámetro 10 – 30 μm , compatibles con la actividad de actinomicetos, en los horizontes profundos, poco desarrollada sin embargo bajo irrigación (M). En superficie, estos poros tubulares se cambian en poros planos gofrados que no se cierran al expansión, cuyo geometría se acerca a los micro-agregados identificados, con residuos orgánicos y de bacterias. Los suelos con pastos fertilizados (G) muestran una abundancia particular de agregados derivados de turriculos, con poca porosidad interna en escamas, separados por tabiques rugosas.

Los volúmenes y las disponibilidades de las reservas en aguas fueron evaluados con cultivos de maíz en macetas. Los suelos fuertemente laborados tienen una pequeña reserva disponible, con una gran contribución del agua de la porosidad matricial que conduce el maíz a un estrés hídrico precoz. Los suelos con pastos sin aporte tienen una gran reserva en agua estructural, ligada a la porosidad de origen biológico, funcionalmente separado de la reserva en agua matricial. En los pastos fertilizados e irrigados, la desaparición de los tubos finos provoca una disminución de la reserva en agua estructural. La parte de los poros intersticiales de la micro-agregación bacteriana deberá ser evaluada.

Estos resultados permiten concluir que es necesario disminuir la labranza intensiva del suelo, que altera la porosidad preexistente – sobre todo en (M) más inestable – y los substratos y agentes de la pedogénesis biológica. Es necesario también hacer rotaciones con pastos de temporal o con riego discontinuo. La actividad de las lombrices no tiene efecto directo creciente sobre la disponibilidad del agua; más allá de 40 g/kg de C, no mejora la conductividad hidráulica matricial y tiene más un efecto negativo sobre la porogénesis microbiológica. El manejo de esta última por la manipulación de la restitución en carbono y del régimen hídrico es una vía a profundizar para el manejo sustentable de los vertisoles.

Palabras claves

Vertisoles, porosidad, uso del suelo, actividad biológica, trabajo del suelo, disponibilidad en agua.

L'analyse du système de porosité des sols s'appuie classiquement sur la distinction de la porosité texturale et de la porosité structurale (Stengel, 1979).

La première, représentant les vides ménagés par l'assemblage des particules solides, est évaluée par la mesure de la porosité sur des échantillons de taille décroissante (Monnier et al, 1973). La seconde, représentant les vides créés par l'activité biologique, les pratiques culturales et l'état hydrique, est évaluée comme la différence entre le porosité totale et la porosité structurale. Dans les Vertisols des Antilles, très riches en argiles gonflantes, le système de porosité a plus récemment été schématisé en trois compartiments, différenciant tant par leur géométrie que par leur mode de formation, et tous trois déformables (Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1995):

(i) la porosité matricielle (taille de 0,1 à 1 μm), toujours saturée par l'eau, peu disponible, dont le volume est conditionné par le mode d'assemblage des particules d'argile et par sa déformation lors des phases d'humectation et de dessiccation (Tessier, 1984);

(ii) la porosité macro-fissurale (large de plusieurs centimètres, profonde de plus de un mètre en période sèche); elle est la conséquence macroscopique de la dessiccation entraî-

nant une diminution de la porosité matricielle (retrait matriciel), et de l'ouverture de larges fissures, délimitant des prismes larges de plusieurs décimètres; les macro-fissures jouent un rôle essentiel dans l'aération, et dans l'infiltration (Ruy et al., 1999); elles sont le siège transitoire d'une éventuelle nappe en réseau, résorbée en quelques jours par le gonflement des parois, qui cause une distribution hétérogène durable de la teneur en eau en profondeur (Jaillard et Cabidoche, 1984);

(iii) la porosité structurale à l'intérieur de ces prismes (taille de 10 μm à 1 mm), qui constitue le réservoir d'eau facilement utilisable par les plantes (Ozier-Lafontaine et Cabidoche, 1995), créée en grande partie par l'activité biologique et modifiée par le travail du sol (Cabidoche et Ney, 1987); principalement tubulaire dans les horizons profonds, elle comporte des microfissures dans les horizons de surface.

Cette approche en trois compartiments est particulièrement adaptée à la modélisation hydrologique des Vertisols (Ruy et al, 1999). Les trois niveaux d'approche correspondent du reste aux échelles d'étude des milieux poreux naturels microscopique, macroscopique et mégascopique prises en compte par les géologues (Sahimi, 1995). Le choix du terme "matricielle" plutôt que "texturale" est lié au fait que la méthode de mesure

de la porosité texturale serait ici biaisée par la subsistance de pores structuraux aux échelles de mesures appliquées. Enfin les macro-fissures, bien qu'appartenant à la porosité structurale, sont considérées comme un compartiment spécifique par la nature et l'échelle de leur fonctionnement hydrologique.

Ces grands traits fonctionnels de la porosité ont été antérieurement étudiés sur quelques situations de couverts spontanés ou cultivés en canne à sucre et en maraîchage; cependant le rôle détaillé de l'activité biologique dans la genèse et la déformation de ces compartiments de porosité, ainsi que les conséquences sur la disponibilité de l'eau pour les plantes, n'ont jusqu'ici fait l'objet que de quelques hypothèses parmi lesquelles:

- La conductivité hydraulique de la matrice argileuse étant faible, seules les racines sont susceptibles d'extraire l'eau matricielle en profondeur (Ritchie et Burnett, 1971); ces dernières seraient ainsi le seul moteur de déformation matricielles, et par conséquent de l'ouverture des macro-fissures profondes.

- La présence de porosité structurale tubulaire dans les horizons profonds, forcément d'origine biotique, est associée à une forte disponibilité de l'eau qu'elle contient. A contrario, la faible disponibilité de l'eau contenue dans la porosité matricielle engendre un stress hydrique rapide chez la canne à sucre; ce contraste a été exploité pour créer un nouveau procédé d'avertissement à l'irrigation utilisant la mesure de la contraction verticale du sol (système T.H.E.R.E.S.A., Ozier-Lafontaine et Cabidoche, 1995), mais n'a pas été analysé sur différents systèmes de porosité structurale.

- Les travaux du sol répétés ou effectués en conditions de teneur en eau trop élevée modifieraient ce système de porosité en détruisant la porosité tubulaire et en la remplaçant par une porosité interstitielle d'agrégats; cependant les travaux antérieurs se sont plus attachés à caractériser l'effet des lissages en fond de labour sur l'excès d'eau dans la couche travaillée (Cabidoche et Ney, 1987), qu'à évaluer l'éventuelle baisse de disponibilité de l'eau structurale associée à l'effet mécanique de ces travaux du sol ou à la baisse d'activité biologique qu'ils provoquent.

Cette étude s'attache donc à approfondir ces hypothèses, en déterminant le rôle de l'activité biologique sur l'organisation et la dynamique du système de porosité de Vertisols, et en conséquence sur la disponibilité de l'eau. Elle intègre l'exploitation synthétique de travaux déjà publiés, et des résultats d'expérimentations récentes conduites à la fois dans les Vertisols de la Guadeloupe dont la garniture cationique des argiles est saturée par du calcium échangeable, et donc de cohésion élevée et dispersabilité faible, et dans des Vertisols de la Martinique dont la garniture cationique est aussi saturée en bases, mais avec une proportion notable de magnésium et sodium, qui sont donc plus instables.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

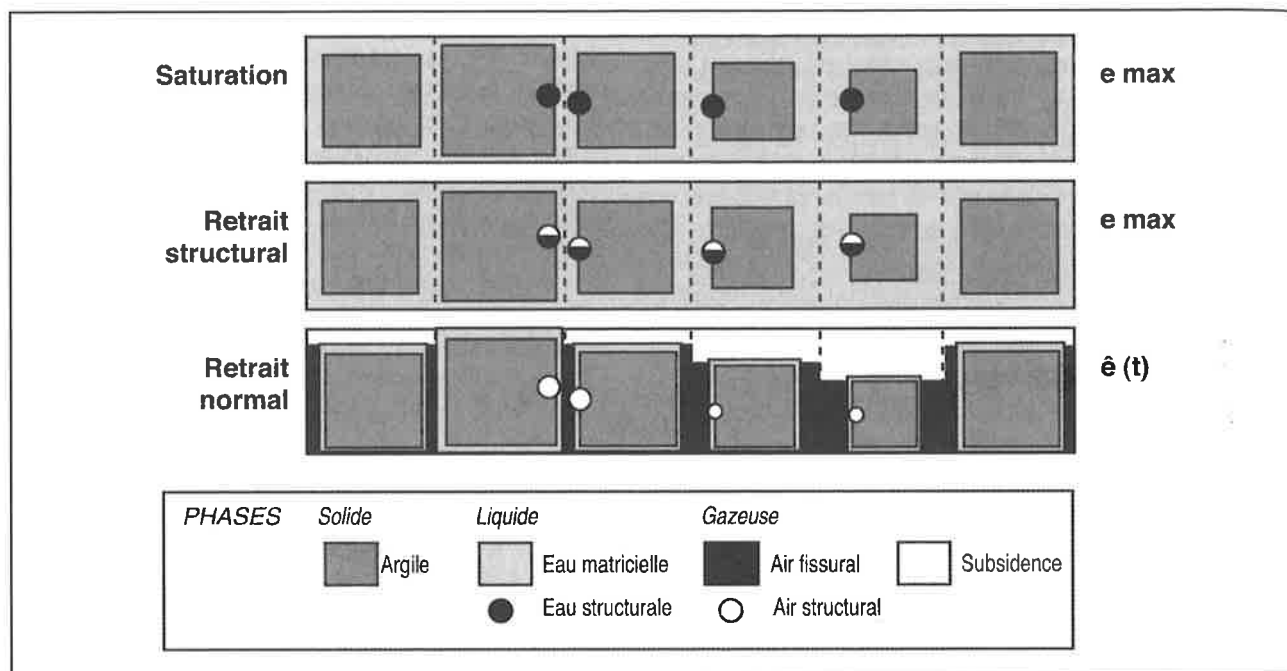
Les Vertisols des Petites Antilles

Les Vertisols objets de l'étude en Guadeloupe et Martinique sont décrits dans Blanchart *et al.* (ce numéro). Ils sont très riches en argile granulométrique (90 et 65 g/100g respectivement), car ils dérivent de roches volcaniques dont tous les minéraux sont altérables. Tous les minéraux primaires de la roche ont disparu en Guadeloupe, ils sont encore présents dans les fractions granulométriques grossières en Martinique. Ces sols sont surtout riches en argiles gonflantes, qui se sont formées en abondance en zone à saison sèche marquée, avec un bilan hydrique nettement déficitaire à l'échelle de l'année, favorable au maintien de la silice et des bases: plus de 70 g/100g de beidellite pour ceux de Guadeloupe, avec une surface spécifique mesurée à l'azote considérable de 600 m²g⁻¹ (Robert *et al.*, 1991). Ces caractéristiques sont responsables du caractère fortement gonflant des sols. Dans les deux premiers décimètres, l'évaporation provoque une méso-fissuration et un self-mulching avec des agrégats de taille centimétrique. Dans les horizons profonds, la matrice argileuse demeure saturée d'eau et continue à l'échelle du dm³ jusqu'au point de flétrissement permanent (1,6 MPa). Le retrait ne provoque pas d'entrée d'air dans la matrice des prismes. Il se traduit uniquement par l'apparition de macrofissures séparant des prismes de plusieurs décimètres de largeur. En outre, ce retrait se produit dans toutes les directions, provoquant aussi une subsidence de la surface, consécutive à la diminution d'épaisseur des couches matérielles de sol (couches contenant une quantité de solide constante). Ainsi, la macrofissuration et la subsidence sont l'exacte compensation volumique du retrait matriciel (Cabidoche et Voltz, 1995). La matrice du sol demeurant saturée, tout l'air présent à un instant donné dans les prismes occupe une porosité par définition non matricielle, que nous qualifierons de porosité structurale intra-prisme. Le système de porosité de ces Vertisols est donc la résultante de trois compartiments, déformables: matriciel, (structural) macro-fissural, et structural (intra-prisme) (figure 1). En toute rigueur, le système de porosité inclut un quatrième compartiment virtuel, au-dessus du sol, associé à la subsidence.

L'infiltration privilégiée dans les macro-fissures provoque une réhumectation matricielle préférentielle de leur voisinage, qui se traduit en permanence par une distribution hétérogène de l'eau, et donc du solide puisque la matrice argileuse demeure saturée (Jaillard et Cabidoche, 1984), dans une couche de sol. Durant la dessiccation, la perte d'eau concerne d'abord les pores structuraux, dont la vidange provoque peu de retrait (retrait "structural" au sens de Stirk, 1954). Ensuite, lorsque la porosité structurale est vide, la perte d'eau matricielle provoque un retrait équivalent en volume: ce retrait est qualifié de "normal" (Keen, 1931). A la fin du retrait normal, la limite d'extraction de l'eau matricielle par les plantes aboutit à une homogénéisation des rapports eau

Figure 1 - Représentation schématique des volumes des trois phases et des déformations des trois compartiments de porosité d'une couche de Vertisol, lors des changements de teneur en eau. e représente l'épaisseur initiale d'une couche de Vertisol; après dessiccation, cette épaisseur est une moyenne spatiale $\hat{e}(t)$.

Figure 1 - Scheme of the three phase volumes and of the three pore compartment deformations, associated with water content changes in a Vertisol layer. e is the initial thickness of a saturated layer; after desiccation, only the spatial average $\hat{e}(t)$ can be measured.



matricielle / solide, et au contraire à des subsidences et volumes de macro-fissures spatialement hétérogènes. Compte tenu de cette variabilité spatiale, ces Vertisols posent concrètement des problèmes d'estimation des teneurs moyennes en solide, en eau, et des épaisseurs à un instant donné (Voltz et Cabidoche, 1995; Cabidoche et Voltz, 1995).

Modes d'usage des Vertisols

Une sélection de situations a été effectuée, sous l'hypothèse que les modes d'usage des Vertisols influent différemment sur l'organisation et le fonctionnement hydrique de leurs systèmes de porosité, soit directement à cause des pratiques culturales et des flux imposés par les couverts cultivés, soit par les modifications qu'elles induisent sur l'activité biologique prise en tant qu'agent déterminant la construction du système de porosité. Ces situations sont décrites dans Blanchart *et al.* (ce numéro), leur position sur les deux déterminants présumés d'inflexion de l'activité biologique, le travail du sol et l'irrigation-fertilisation est rappelée dans la figure 2. Les lettres majuscules indiquent l'occupation du sol: J pour jachère herbacée à *Dichanthium aristatum*, PC pour prairie à *Cynodon dactylon*, PD pour prairie à *Digitaria decumbens*, S pour Canne à sucre, NU

pour sol maintenu nu et travaillé trois fois par an, M pour cultures maraîchères. La lettre minuscule indique la garniture cationique du Vertisol: c pour calcique, m pour magnésosodique. Le nombre indique la durée de l'occupation, éventuellement renseignée de l'occupation précédente.

Caractérisation hydrique de la porosité matricielle

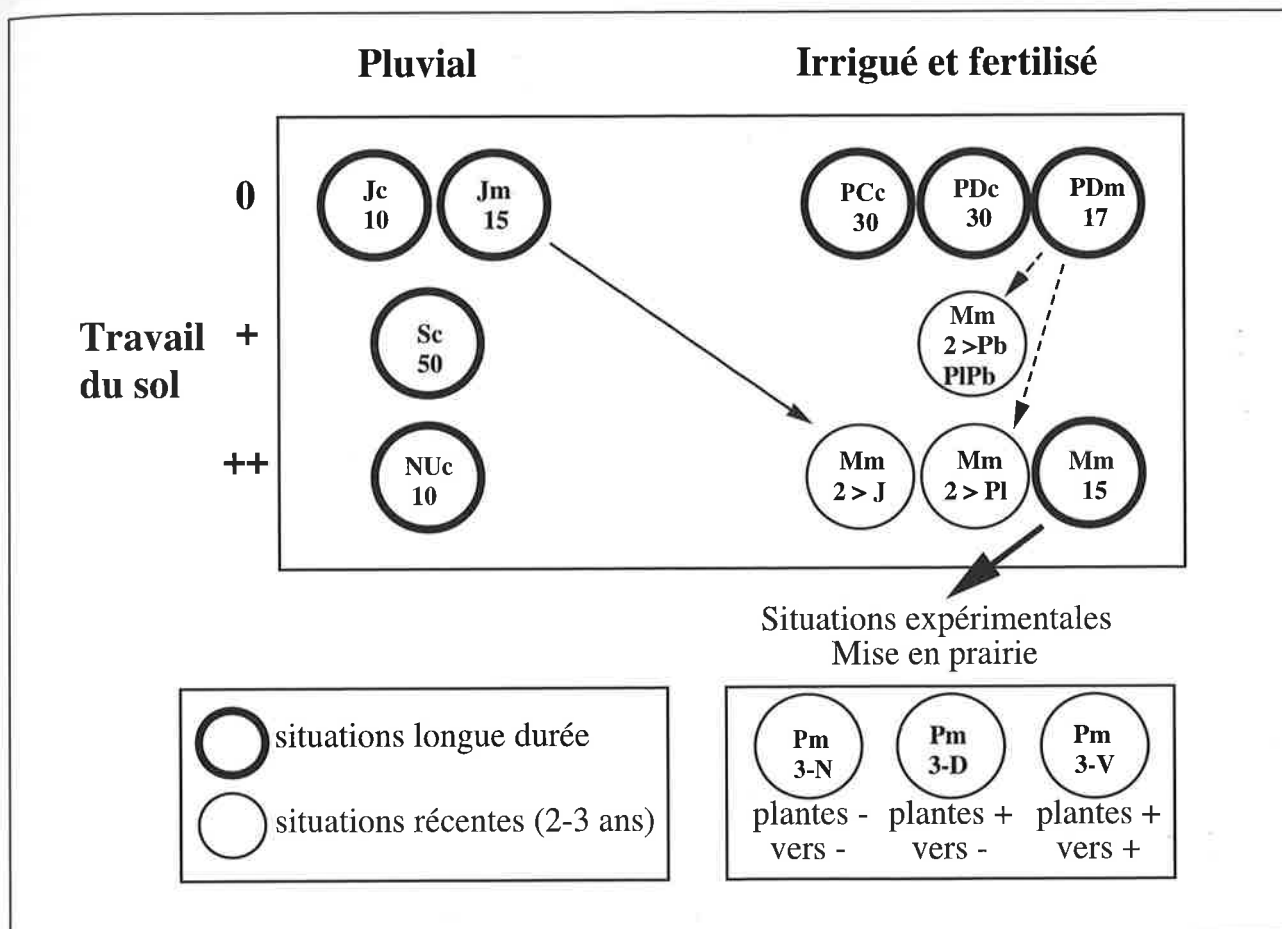
Conductivité hydraulique matricielle en "non saturé":

Sa mesure est impossible avec des méthodes usuelles utilisant des tensiomètres, à cause des mouvements du solide, qui provoquent des décrochements précoces, et de la représentativité de la sphère de mesure. Une nouvelle méthode, basée sur la méthode des profils instantanés, a été mise au point (Ruy et Cabidoche, 1998). Elle utilise l'évaporation sur la face supérieure d'un échantillon cylindrique non remanié pour créer un gradient de teneurs en eau mesuré au bout de temps différents sur des tranches horizontales successives. Chaque tranche est référencée géométriquement, pour tenir compte des déformations. Des précautions expérimentales ont été prises afin de ne

Figure 2 - Situations étudiées à la Guadeloupe (indice c pour calcique) et à la Martinique (indice m pour magnésien), en fonction de leur mode d'usage.

J = jachère herbacée spontanée; S = canne à sucre; NU = sol nu; P = prairie artificielle (C = *Cynodon dactylon*; D = *Digitaria decumbens*); M = maraîchage; le nombre indique l'ancienneté d'usage en années.

Figure 2 - Codes and characteristics of sites studied in Guadeloupe (c index for calcium) and Martinique (m. index for magnesium). J = grass fallow; S = sugarcane; NU = bare soil; P = grassland (C = *Cynodon dactylon*; D = *Digitaria decumbens*); M = vegetables; the number indicates the minimum soil use duration in years.



pas lisser la face supérieure de l'échantillon : nous avons observé que le flux évaporatif est 5 fois plus faible à travers une surface lissée lors du découpage d'une carotte qu'à travers une surface naturelle obtenue par self-mulching accéléré à l'air chaud. Ces gradients de teneurs en eau permettent de calculer la diffusivité puis la conductivité hydraulique apparentes (par rapport à un repère fixe), mais aussi la diffusivité "solitique" car le solide se déplace également. Finalement la conductivité hydraulique au sens de Darcy est calculée non pas dans un repère fixe, mais par rapport au matériau solide qui se déplace en se déformant. Les valeurs obtenues (figure 3) sont très faibles, illustrant la très lente circulation de l'eau dans la matrice argileuse riche en smectites.

La conductivité hydraulique a été mesurée sur deux horizons de la situation PCc30, sous prairie artificielle fertilisée et irriguée :

- l'horizon superficiel montrant une teneur en carbone extrême, supérieure à 60 g kg⁻¹ dans la couche 0-10 cm, de plus de 45 g kg⁻¹ jusqu'à 40 cm, plus de 70% de micro-agrégats organo-minéraux à débris organiques dans les agrégats stables à l'eau de 2 à 20 µm, et une densité élevée de vers de terre (Blanchart *et al*, ce numéro).

- l'horizon profond prismatique brun-jaune, ne contenant plus que 10 g kg⁻¹ de carbone sous forme de matière organique indifférenciable, sans trace d'activité des vers de terre.

Figure 3 - Conductivité hydraulique relative au solide, mesurée sur échantillons non remaniés cisailés à l'air chaud (situation PCc30, couche 70-90 cm).

Figure 3 - Hydraulic conductivity related to solids.

Measurements were made on undisturbed samples whose the upper face underwent hot air blowing (PCc30 situation, 70-90 cm layer).

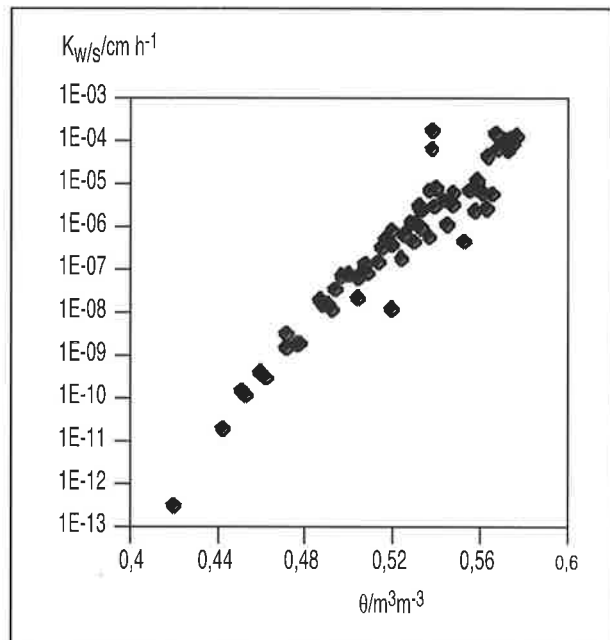


Figure 4 - Le transducteur d'épaisseur de couche de sol T.H.E.RE.S.A. (Brevet INRA). Le tube central 1 est solidaire de la base de la couche (en clair) par l'intermédiaire du filetage 5, le tube coaxial périphérique à frottement doux est solidaire du sommet de la couche par l'intermédiaire du filetage 4. Le manchon 3 évite le contact des couches supérieures avec le tube 2 et occupe le volume résiduel du forage. Toute variation d'épaisseur de la couche se traduit par un déplacement relatif opposé des tubes 1 et 2, mesurable sur la colonne émergente.

Figure 4 - The THERESA soil layer thickness transducer (INRA patented). 1, Central cylindrical PVC rod joined to the bottom of the layer by the thread 5. 2, Peripheral PVC pipe joined to the top of the layer by the thread 4. 3, PVC pipe occupying the bore-hole. Each thickness variation produces opposite displacements of the tubes 1 and 2, which can be measured on the emerging column.

Teneur en eau matricielle :

Les mouvements importants de sol interdisent d'utiliser les outils conventionnels de mesure de teneur en eau (TDR, sondes neutroniques, blocs poreux...) à cause des biais affectant les capteurs (entrée d'air, décollements). Ces mouvements sont en revanche un atout : si l'on connaît le rapport entre leurs composantes horizontale et verticale, la mesure des mouvements verticaux permet de calculer les variations de volume apparent des prismes, exactement liées aux départ ou entrée d'eau dans le réseau matriciel (Cabidoche et Voltz, 1995). C'est ainsi qu'a été créé le système T.H.E.RE.S.A. (Transferts Hydriques Évalués par le RETrait des Sols Argileux) qui permet de calculer les variations de teneur en eau matricielle de couches de sols à partir de la mesure de leurs variations d'épaisseurs (Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1995). Les transducteurs (figure 4), de construction simple et de faible coût, peuvent être aisément multipliés pour prendre en compte la variabilité spatiale de teneur en eau d'une couche.

Caractérisation de la porosité macro-fissurale :

Dans le cadre de cette étude, seules la présence ou l'absence de dynamique fissurale ont été estimées, à partir des transducteurs T.H.E.RE.S.A., en application de la tri-dimensionalité des mouvements : si aucun mouvement vertical n'est mesuré, il n'y a ni ouverture, ni fermeture des fissures. Deux situations de Vertisol de la Martinique ont été équipées chacune de transducteurs T.H.E.RE.S.A. permettant de mesurer la sollicitation matricielle de deux couches, de profondeurs ini-

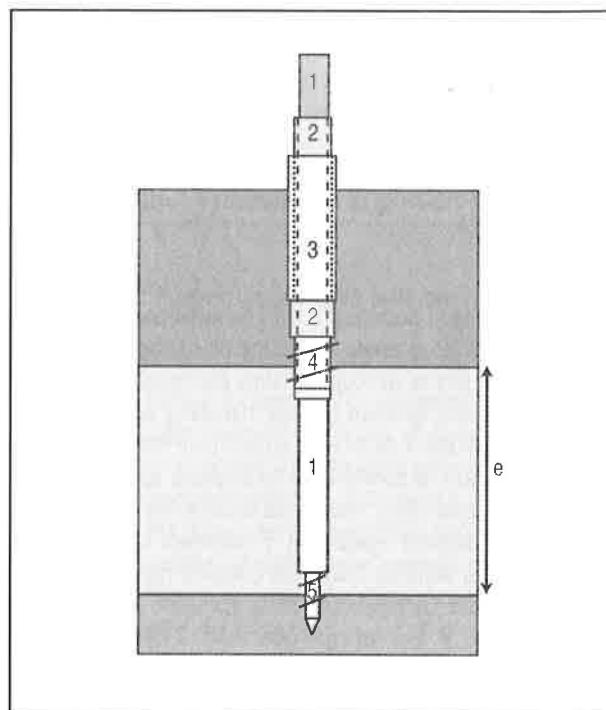
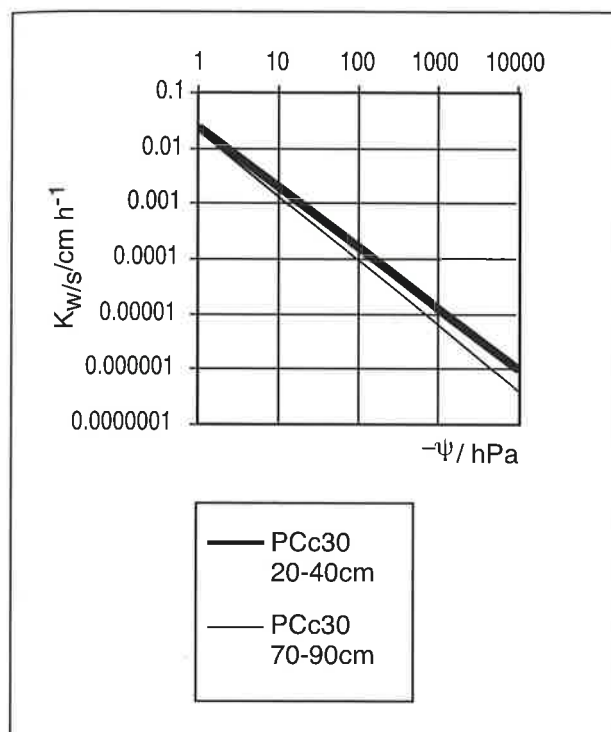


Figure 5 - Conductivité hydraulique relative au solide en fonction du potentiel matriciel. Ajustement des mesures sur échantillons non remaniés des horizons superficiel et profond sous prairie artificielle de Guadeloupe (PCc30) (Ruy, 1997).

Figure 5 - Hydraulic conductivity related to solids, as a function of matric potential. Fitting of measurements applied to undisturbed samples. Upper and deep layers under artificial grassland in Guadeloupe (PCc30) (Ruy, 1997).



tiales 10-30 cm et 30-50 cm à l'état "fentes fermées". La première situation (Pm3-D) correspond à une prairie de *Digitaria decumbens*, installée depuis 3 ans. La deuxième, initialement identique, a été désherbée chaque mois (Pm3-N); seules des pousses récentes d'adventices ont développé des racines jusqu'à plus de 10 cm. Les variations d'épaisseur sur les trois transducteurs T.H.E.R.E.S.A. installés par couche ont été mesurées au pied à coulisse, avec une incertitude de $\pm 0,3$ mm.

Caractérisation de la porosité structurale

Volume

Le volume de la porosité structurale intra-prisme est par définition le volume intra-prisme occupé par de l'air en phase de retrait normal. Ce volume, rapporté à la masse de solide, est le volume spécifique dont l'évaluation requiert la mesure: (i) du volume apparent d'échantillon, par mesure de poussée

d'Archimède d'échantillons de prismes de 100 à 1000 cm³ ensachés sous vide dans des sacs plastiques (Cabidoche et Ney, 1987), ou par immersion dans le pétrole (Monnier *et al.*, 1973) pour des échantillons de 1 à 50 cm³, (ii) de sa teneur en eau gravimétrique et (iii) de sa densité de solide mesurée par pycnométrie à l'eau. Ces mesures ont été répétées de manière à couvrir la gamme des teneurs en eau au champ et à décrire correctement la courbe de retrait du matériau.

Architecture

Une méthode d'imprégnation du sol visant à remplir de résine la seule porosité structurale intra-prisme (Cabidoche et Guillaume, 1998) a été mise au point. Elle est fondée sur deux propriétés singulières des Vertisols:

(i) Au cours du retrait, seule la porosité structurale occupée par de l'air est accessible à une résine non miscible avec l'eau.

(ii) La matrice, très fortement argileuse et gonflante, peut être intégralement dispersée à pH basique après une attaque à l'eau oxygénée.

La résine d'imprégnation contient du dioxyde de chrome, fluorescent sous des rayons UVA. On obtient ainsi un moulage tri-dimensionnel continu de la porosité structurale occupée par de l'air, que l'on peut observer sous lumière UVA. On a vérifié que les volumes de résine du moulage et les volumes d'air mesurés sur échantillons adjacents sont égaux, avec 75% de la variance des premiers expliquée par les seconds.

Fonctionnement hydrique

Quatre matériaux ont été préparés pour analyser l'impact de l'architecture porale sur la disponibilité de l'eau. Un monolithe non remanié (N), a été prélevé entre 30 et 70 cm de profondeur dans l'horizon (B) de Jc10 (prairie spontanée à *Dichantium aristatum*), comportant d'abondants pores tubulaires de diamètre 10-30 μ m. Les trois autres matériaux ont été préparés à partir de sol prélevé sous Jc10 entre 10 et 30 cm:

- un matériau (Fg) a été fragmenté par alternance d'humectation et de dessiccation; ce traitement simule un premier travail du sol, réalisé en conditions sèches derrière une jachère, puis laissé en conditions de pluviométrie naturelle avant plantation;

- un autre matériau (Pg) a été pétri à la bétonnière à l'état humide pour détruire la porosité structurale, puis désagrégé sous pluviométrie naturelle; il a subi ensuite une irrigation massive, sans drainage pendant 15 jours; ce traitement simule un travail du sol répété en conditions humides immédiatement suivi d'une irrigation excessive;

- le dernier matériau (P) a été préparé comme Pg, mais n'a été arrosé qu'au dernier moment; ce dernier traitement simule un travail du sol excessif suivi d'une dessiccation.

Les volumes et disponibilités des réservoirs d'eau associés à ces quatre matériaux ont été évalués par des essais en containers cylindriques de 30 dm³ comportant trois plants de

maïs (*Zea mays*) par container. Un film plastique a été placé en surface pour éviter l'évaporation. La consommation d'eau totale journalière a été obtenue par des pesées corrigées de l'immobilisation en biomasse. La consommation d'eau matricielle a été évaluée à partir des variations d'épaisseurs des matériaux dans chaque container, mesurées par des transducteurs T.H.E.R.E.S.A. instrumentés de capteurs potentiométriques de précision 50 μm . La consommation d'eau structurale a été calculée par différence entre la consommation totale et la consommation d'eau matricielle.

Les modalités expérimentales ont comporté successivement une saturation au semis, une dessiccation par puisage racinaire jusqu'à atteindre la seule contribution de la consommation matricielle, une irrigation égale en volume à la porosité structurale, et enfin une deuxième dessiccation.

On a vérifié que l'efficacité de l'eau sur la production de biomasse était identique sur les quatre traitements, c'est-à-dire que seule l'eau était le facteur limitant variable entre les différents traitements.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Micro-agrégation, richesse organique et conductivité hydraulique matricielle

Les ajustements des courbes de conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel (figure 5, d'après Ruy, 1997) ne sont pas significativement différents entre les deux horizons de la situation PCc30. Pour les potentiels les plus bas, à la limite de l'extractibilité de l'eau par les racines, la conductivité est double dans l'horizon superficiel, mais non significativement différente de celle de l'horizon profond. L'abondance du carbone et des éléments organiques figurés n'a donc pas d'influence notable sur la conductivité hydraulique matricielle, la matrice étant comme nous le verrons plus loin, pénétrée par l'intense activité des vers.

Extraction racinaire et macro-fissuration (figure 6)

La perte d'eau matricielle du sol sous *Digitaria decumbens* (Pm3-D) est précoce, et synchrone entre les couches 10-30 et 30-50 cm à partir du 30^e jour. Les consommations matricielles des deux couches sont analogues, la couche 10-30 cm, de densité racinaire plus élevée, montrant une consommation un peu supérieure. À l'opposé, le sol nu (Pm3-N), subissant une extraction racinaire minime, ne montre qu'une perte d'eau matricielle tardive de la couche 10-30 cm, compatible avec une faible évaporation en l'absence de plantes. La couche 30-50 cm ne montre sous sol nu aucun retrait significatif, et ne subit ainsi aucune variation de teneur en eau matricielle.

L'extraction de l'eau par les racines est donc le seul moteur de la dessiccation matricielle en profondeur. C'est par consé-

quent aussi le seul moteur de l'ouverture de la fissuration, dont la profondeur est sensiblement la même que celle des racines actives, sous un couvert végétal donné. Ainsi un trait majeur du fonctionnement hydrique et mécanique des Vertisols, la macro-fissuration profonde, est sous la dépendance de l'activité racinaire.

Forme des pores et assemblages de pores structuraux : origine biotique et déformations

L'application de la méthode de moulage des seuls pores structuraux, et sa confrontation avec les agents biologiques et la présence d'agréats bactériens ou organo-minéraux à débris organiques figurés décrits dans Blanchart *et al.* (ce numéro) a permis :

- d'établir une typologie de formes de pores structuraux,
- d'explicitier l'origine, biotique ou mécanique de ces formes,
- d'en décrire les assemblages principaux.

La connaissance des formes et assemblages a enfin permis d'émettre des hypothèses de moteurs de déformation à partir des changements de volume mesurés lors du retrait. Ces résultats sont résumés dans le tableau 1.

Un premier groupe correspond à des objets de forte elongation et de section circulaire ou annulaire dont l'origine biologique est incontestable. Les plus gros, cylindriques, sont attribuables à d'anciens passages racinaires et galeries de vers de terre (pl. 1, c). En revanche les filaments de 10 à 30 μm de diamètre de forme hélicoïdale sont d'anciens passages d'hyphes. Des répliques d'échantillons adjacents aux échantillons imprégnés riches en filaments, mises au contact de milieu sélectifs, montrent une abondance particulière d'actinomycètes (Prior, communication personnelle) qui pourraient être responsables de cette porosité. Cette porosité micro-tubulaire est présente jusque dans les agrégats de 0,1 mm de diamètre. Elle est donc trans-structurale au sens de Ringrose-Voase (1987). Ces tubes inter-connectés s'assemblent en tignasses.

Un deuxième groupe concerne des objets dérivant de l'agréation et de la micro-agrégation d'origine biologique. Les méats polyconcaves représentent les interstices d'agréats arrondis, dérivés de turricules de vers. La micro-agrégation associée à l'activité biologique, mise en évidence dans Blanchart *et al.* (ce numéro), ne se traduit pas par un réseau régulier de maille fine. Tout au plus apparaissent parfois des écailles de résine éventuellement imputables à des espaces entre micro-agréats. Ces micro-agréats s'individualisent lors de l'agitation dans l'eau, mais ne sont pas séparés in situ par des pores de plus de 1 μm , limite inférieure de taille des moulages observés. En revanche, la micro-agrégation bactérienne ou organo-minérale à débris organiques figurés est associée à la séparation d'agréats par des pores plans gaufrés (pl. 1, h), dont la rugosité interdit la fermeture totale lors du regonflement. Il s'ensuit une rémanence des fonctions de réservoir et

Figure 6 - Variations d'épaisseur des couches 10-30 cm et 30-50 cm de deux situations de Vertisol de la Martinique, mesurées par des transducteurs THERESA. Pm3-N: sol nu, régulièrement desherbé. Pm3-D: prairie de *Digitaria decumbens*.

Figure 6 - Thickness variations of the 10-30 and 30-50 cm layers, measured by THERESA transducers under to sites of Martinique. Vertical bars represent rainfall amounts. Pm3-N: bare soil. Pm3-D: *Digitaria decumbens* grassland.

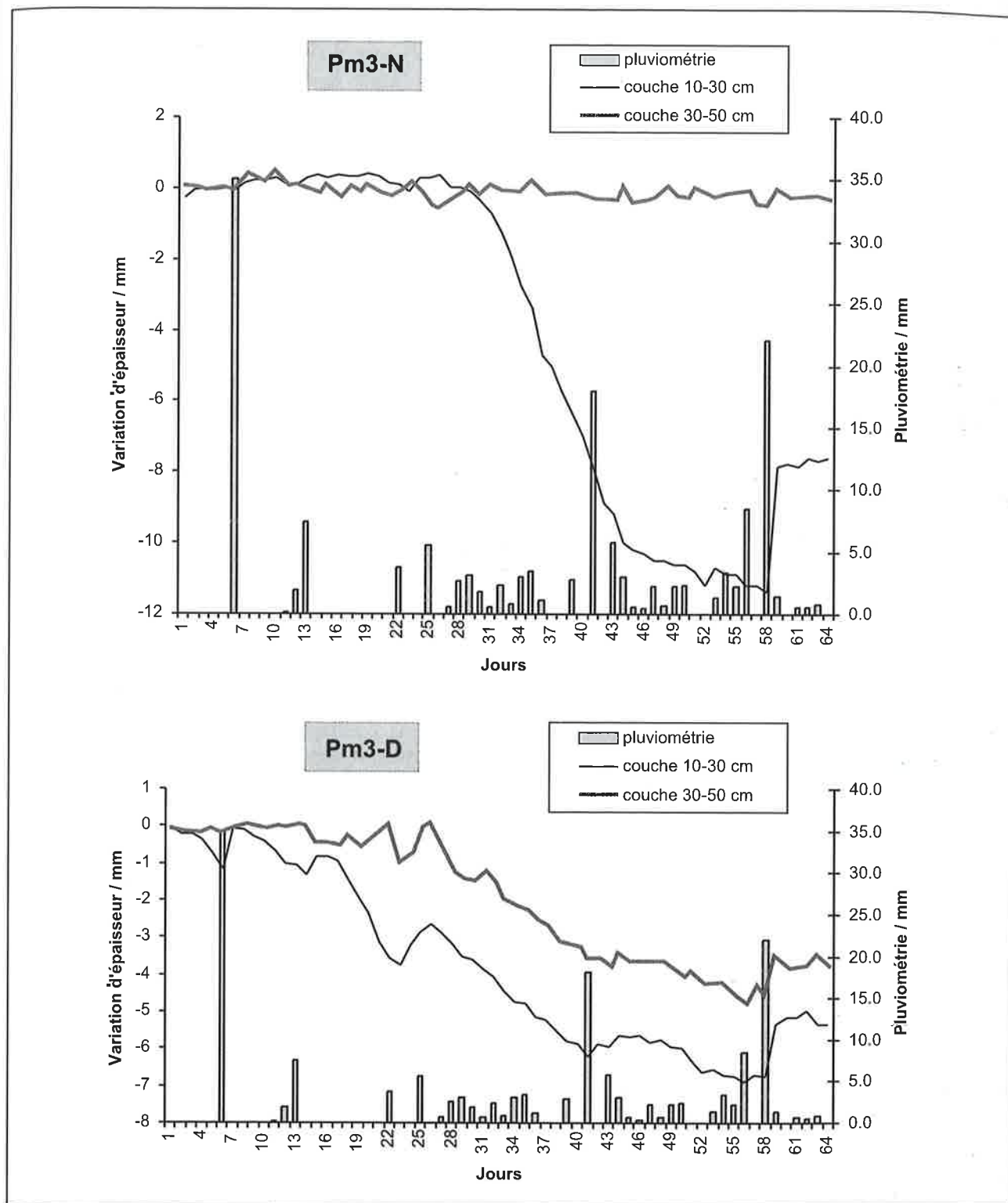


Tableau 1 - Typologie des formes et des assemblages architecturaux de moulages de pores structuraux interconnectés ; origine biologique ou mécanique probable ; interprétation des changements de volume en termes de déformations associées.

Table 1 - Typology of shapes and organizations of inter-connected structural pore casts ; biologic or mechanical probable origin ; interpretation of volume changes with associated deformations.

<i>Forme de moulage</i>	Taille (µm) Ø = diamètre e = largeur l = longueur	Origine (Origine biologique en italique)	Assemblage, et pente de la droite de retrait « normal »		Déformation au retrait	Déformation au gonflement
<i>Tube</i>	Ø = 30-500	<i>périphérie racine vivante</i>	Tignasse >1	Spongi- forme fin ≥ 1	?	?
<i>Cylindre</i>	Ø=500-3000 Ø = 30-500	<i>galerie de vers passages racines mortes</i>			contraction semblable	Dilatation semblable
<i>Filament hélicoïdal</i>	Ø = 15-30	<i>passage hyphes actynomycètes</i>			contraction semblable	Dilatation semblable
<i>Cloison gaufree</i>	e = 20-30	<i>inter-agrégats à microagregats</i>	Spongi- forme grossier =1	≥ 1	stable puis ouverture	Fermeture puis stable
<i>Méat polyconcave</i>	e = 50-200	<i>inter-agrégats grumeleux</i>			stable	Stable
<i>Ecailles</i>	e = 1-10	<i>inter- microagregats</i>	Cellu- laire <1		?	?
<i>Cloison Plane</i>	e = 20-100	inter-agrégats pétris ou fissure intra-agrégat,			ouverture	Fermeture
<i>Créneau diédrique</i>	e = 10 l = 50	retrait péri- agregat			ouverture	Fermeture
<i>Méat polyédrique</i>	e = 100-1000	inter-agrégats pétris			stable	Stable
<i>Voile</i>	e = 50-100, l>1000	méso- fissuration		drapé <1	ouverture	Fermeture

de transferts des pores plans gaufrés. L'assemblage général de ce deuxième groupe, comportant en plus quelques tubes fins intra-agrégats, a été qualifié de spongi-forme.

Le troisième groupe comporte des pores à faces lisses parallèles ou légèrement divergentes, qui n'apparaissent qu'après une dessiccation matricielle significative. Ils sont clairement attribuables à la méso- ou micro-fissuration d'une matrice continue (pl. 1, f). L'assemblage de ces cloisons et de méats polyédriques est cellulaire.

Ces assemblages montrent différentes modalités de changements de volume global, que l'on peut estimer par la pente de la droite de retrait "normal", c'est-à-dire la pente peu différente de 1 de la droite qui suit la vidange des pores structuraux. Une analyse fine de ces pentes montre trois groupes (Cabidoche et Guillaume, 1998) :

- les assemblages en tignasse et les assemblages spongi-formes, comportant essentiellement des objets tubulaires et des méats polyconcaves, sont associés à une pente significati-

vement supérieure à 1 ; cette pente est compatible avec une déformation des pores semblable à celle de la matrice encaissante ;

- les assemblages cellulaires, faits d'objets à faces lisses parallèles ou légèrement divergentes sont associés à une pente inférieure à 1, c'est-à-dire avec un transfert de porosité matriciel vers la porosité structurale lors du retrait ; l'entrée d'air associée fait que le retrait n'est plus normal, mais résiduel, au sens de Haynes (1923), même si la pente est peu différente de 1.

- les pentes non différentes de 1 sont associées à des formes dont on peut penser qu'elles ont des déformations antagonistes ; une pente de 1 est donc le résultat d'un hasard combinatoire.

L'analyse fine des courbes de retrait obtenues sur de petits volumes montre donc que le retrait normal stricto sensu ne peut résulter que de déformations antagonistes de pores structuraux, et que la valeur de la pente renseigne directement sur la prédominance des pores d'origine biologique ou des pores d'origine méso- ou micro-fissurale.

Architectures de porosité structurale intraprisme et disponibilité de l'eau (Guillaume, 1998)

Les résultats obtenus à partir des quatre matériaux cultivés en containers sont présentés sous forme de courbes de retrait de prismes inter-fissuraires (*figure 7*). Trois phases successives peuvent être distinguées sur chaque dessiccation :

- un retrait structural sans changement important de volume, où l'eau est extraite de la porosité structurale,
- un retrait mixte, où le départ d'eau de la porosité structurale coexiste avec le départ d'eau de la porosité matricielle, engendrant un retrait important,
- un retrait maximal, linéaire, "normal" au sens où la pente est voisine de 1 ; cette phase linéaire a été ajustée par régression linéaire sur le nuage de points expérimentaux, amputé des valeurs supérieures jusqu'à maximalisation du coefficient de régression ; les équations de régression relatives à chaque matériau, mentionnées dans la *figure 7*, ont été appliquées pour extrapoler la droite de retrait maximal, afin de calculer la teneur en eau structurale pendant les phases de retrait structural et mixte.

Le monolithe non remanié (N) a fourni après la dernière dessiccation un moulage dont l'assemblage est en tignasse et minces cloisons en formes de voiles. Il comportait un réservoir structural important (*figure 7B*), équivalent à une teneur en eau de $0,18 \text{ kg kg}^{-1}$, complètement saturé par l'eau au départ, puis consommé intégralement au cours d'un retrait structural strict. Ce réservoir s'est montré fonctionnellement disjoint du réservoir matriciel, en humectation comme en dessiccation. La faible pente du retrait linéaire maximal est peu compatible avec un retrait "normal" ; il s'agit plutôt d'un retrait résiduel suivant immédiatement le retrait structural. Cette entrée d'air s'est traduite morphologiquement par l'abondance des voiles, qui sont

le moulage d'une méso-fissuration induite par des ruptures mécaniques lors de la manipulation des monolithes, car cet artefact n'a pas été observé sur les sols naturels.

Le matériau fragmenté sans pétrissage (Fg) a fourni en fin d'essai un moulage dont l'assemblage est spongiforme fin. Il comportait un important réservoir structural (*figure 7A*), équivalent à $0,23 \text{ kg kg}^{-1}$, contenant dès le début une proportion élevée d'air. La perte d'eau de ce réservoir a eu lieu pour moitié lors du retrait structural, et pour moitié lors du retrait mixte qui a suivi. Une deuxième irrigation a rempli à nouveau la porosité structurale, sans entraîner de gonflement significatif. Puis les pertes d'eau en retrait structural et mixte ont repris. Le système poral de ce matériau se caractérise par une relative indépendance fonctionnelle des pores structuraux et matriciels, surtout à l'humectation. La perte d'eau matricielle ne provoque pas d'ouverture de méso- ou micro-fissures. Les pores structuraux tubulaires ou en méats, subissent une contraction semblable à celle de la matrice dont la traduction est une pente de retrait linéaire supérieure à 1.

Les deux matériaux (Pg et P) pétris ont fourni des moulages d'assemblages cellulaires. Leurs fonctionnements hydriques ont été voisins, et très différents de ceux des précédents N et Fg. Le réservoir représenté par la porosité structurale était faible, respectivement $0,15$ et $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$, et contenait de l'air dès le début. Le retrait structural strict a été peu important en P (*figure 7D*), probablement associé à la vidange des dièdres des méats polyédriques. Il était inexistant en Pg (*figure 7C*) où, dès le début, l'eau de la porosité structurale a été consommée en même temps que l'eau de la porosité matricielle. La perte d'eau matricielle précoce en Pg a été autorisée par le long délai d'humectation initiale, qui a permis une augmentation du potentiel de l'eau et de la conductivité hydraulique matriciels ; en même temps, elle était la principale perte d'eau possible, dans la mesure où les principaux pores structuraux initiaux étaient des méats polyconvexes, peu susceptibles de retenir de l'eau vu leur forme et leur taille. Dans les deux cas, la deuxième irrigation a provoqué une trajectoire en boucle, indiquant des transferts de la porosité structurale vers la porosité matricielle en réhumectation, plus importants en Pg qu'en P. Ces transferts ont été possibles du fait de l'abondance des formes planes et des dièdres de fissuration périphérique des agrégats en Pg.

La consommation d'eau matricielle précoce associée aux assemblages cellulaires a handicapé la croissance en hauteur du maïs par rapport à la croissance enregistrée sur l'assemblage spongiforme, de 15% au 36^e jour, juste avant la deuxième irrigation, et de plus de 20% au 46^e jour, fin de l'essai. La baisse de conductivité hydraulique matricielle a donc été rapidement limitante. La croissance du maïs la plus faible a été enregistrée sur l'assemblage en tignasse, à cause de la saturation initiale de la porosité structurale.

Cet essai a donc globalement montré que la disponibilité de

Figure 7 - Courbes de retrait des « prismes » expérimentaux plantés en maïs, correspondant à quatre architectures remarquables des moulages de pores structuraux : spongiforme (A), tignasse (B), cellulaire présaturée (C) ou initialement sèche (D).

Les carrés pleins indiquent les points retenus pour définir la phase de retrait linéaire, obtenue par regression sur l'ensemble des points progressivement tronqué des valeurs supérieures, jusqu'à optimisation du R^2 .

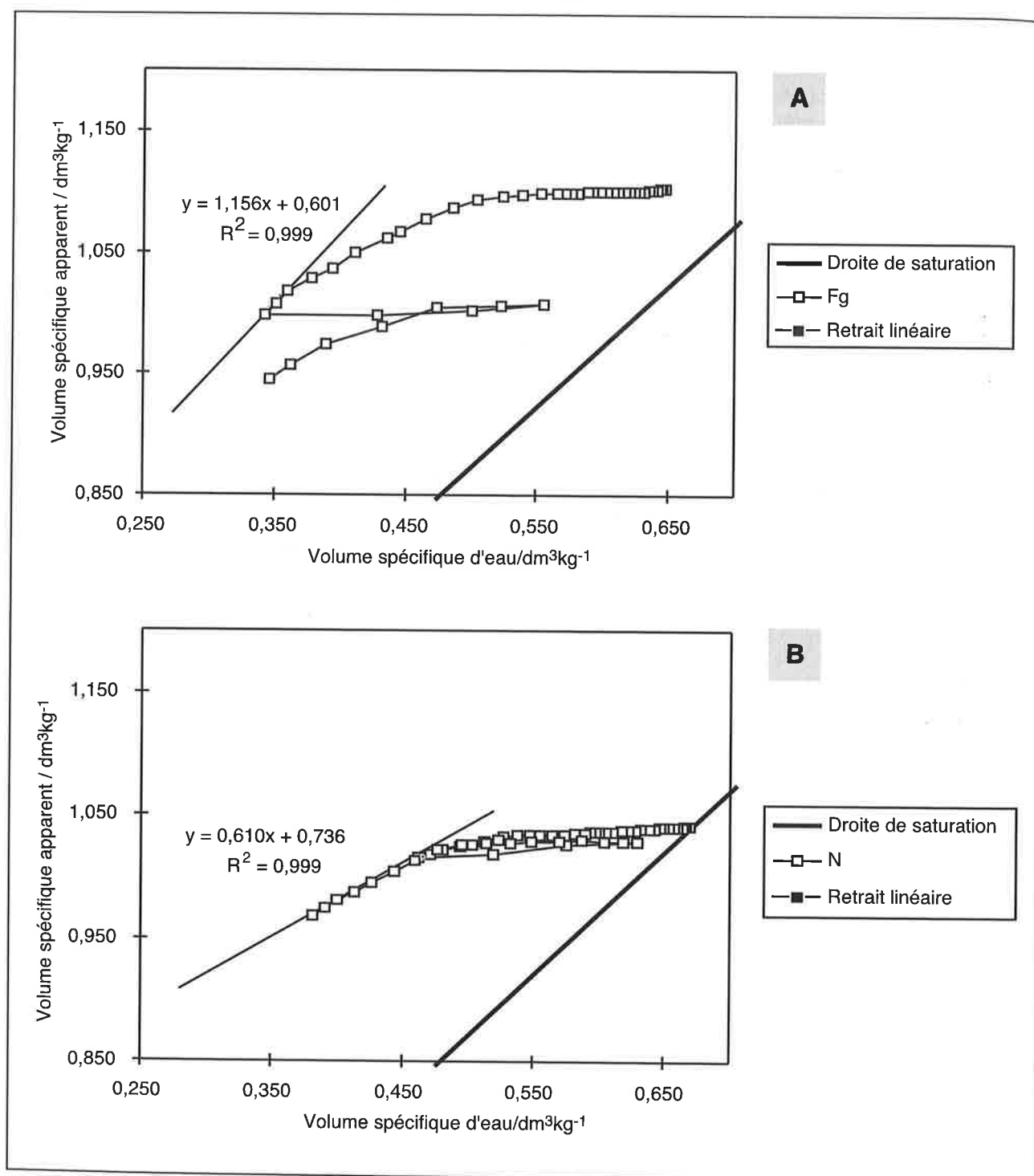
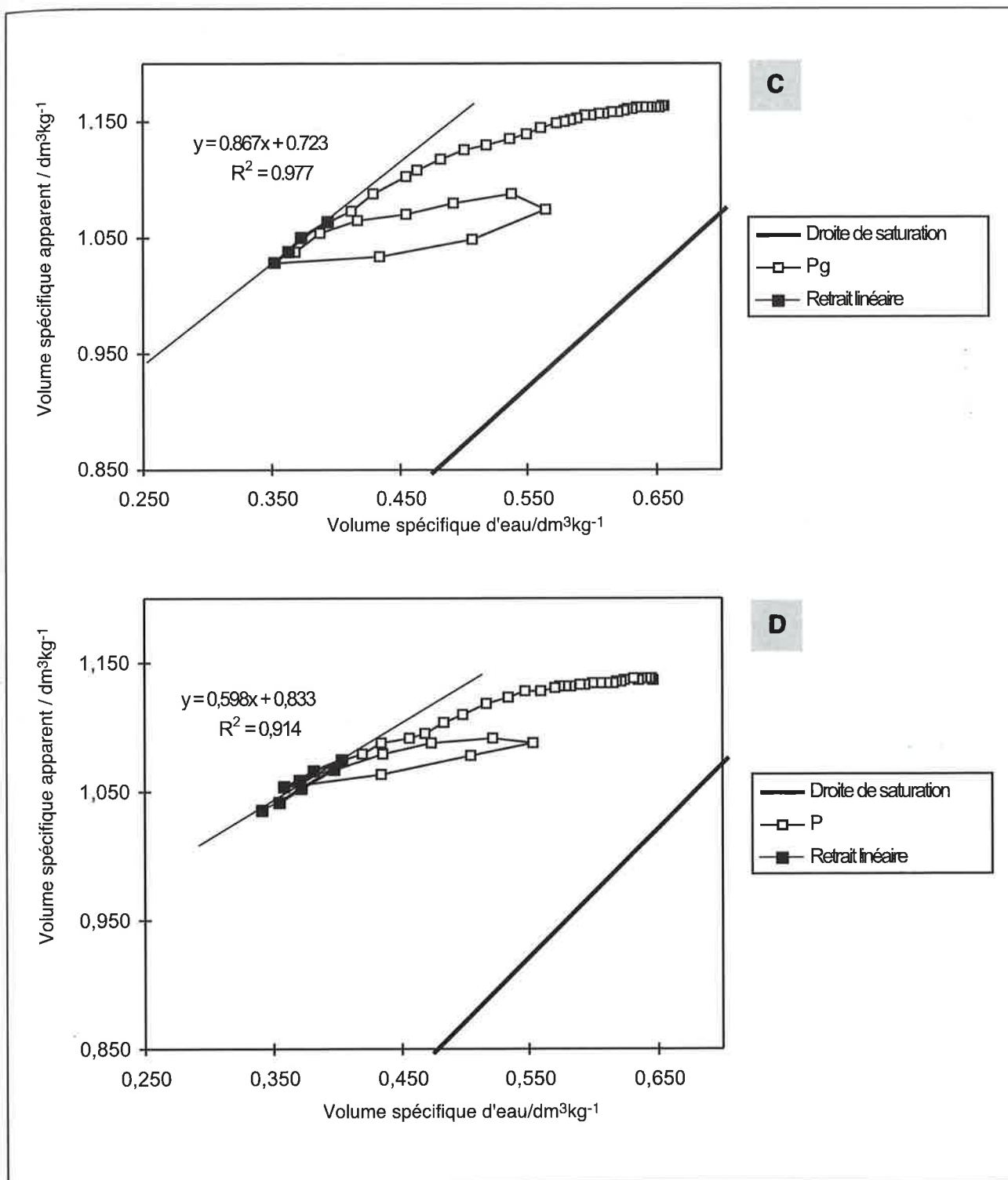


Figure 7 - Shrinkage curves of the experimental prisms, corresponding to four typical organisations of the structural porosity casts : « spongiform » (A), « shock of hair » (B), and initially saturated (C) or dry (D) « cellular ».

Solid squares represent the points which were retained to define the linear shrinkage phase, using linear regression by truncating higher values until the R^2 was optimised.



l'eau est supérieure sur les matériaux disposant de pores structuraux de formes stables et d'origine biologique - cylindres fins, méats polyconcaves, pores plans à parois gaufrées -, que sur les matériaux où cette porosité a été affectée et remplacée par une porosité interstitielle d'agrégats polyédriques obtenus après pétrissage mécanique et auto-fragmentation. Dans le premier cas, on note une relative indépendance fonctionnelle des compartiments structural et matriciel vis-à-vis de l'entrée et de l'extraction de l'eau, et dans le deuxième une forte interaction, le compartiment structural s'accroissant des micro-fissures en dessiccation précoce de la matrice, qui disparaissent lors de sa réhumectation. Ceci a été confirmé *in situ* par l'étude des formes des boucles de gonflement-retrait structural, qui interviennent à n'importe quel état de retrait normal, en relation avec les systèmes de porosité des différentes couches d'un Vertisol cultivé en canne à sucre (Cabidoche et Ruy, 2001).

Volumes et architectures de porosité structurale intra-prisme selon les modes d'usage

Le volume spécifique d'air, correspondant au volume de la porosité structurale observable après imprégnation durant la phase de retrait linéaire, a été mesuré sur deux ordres de gran-

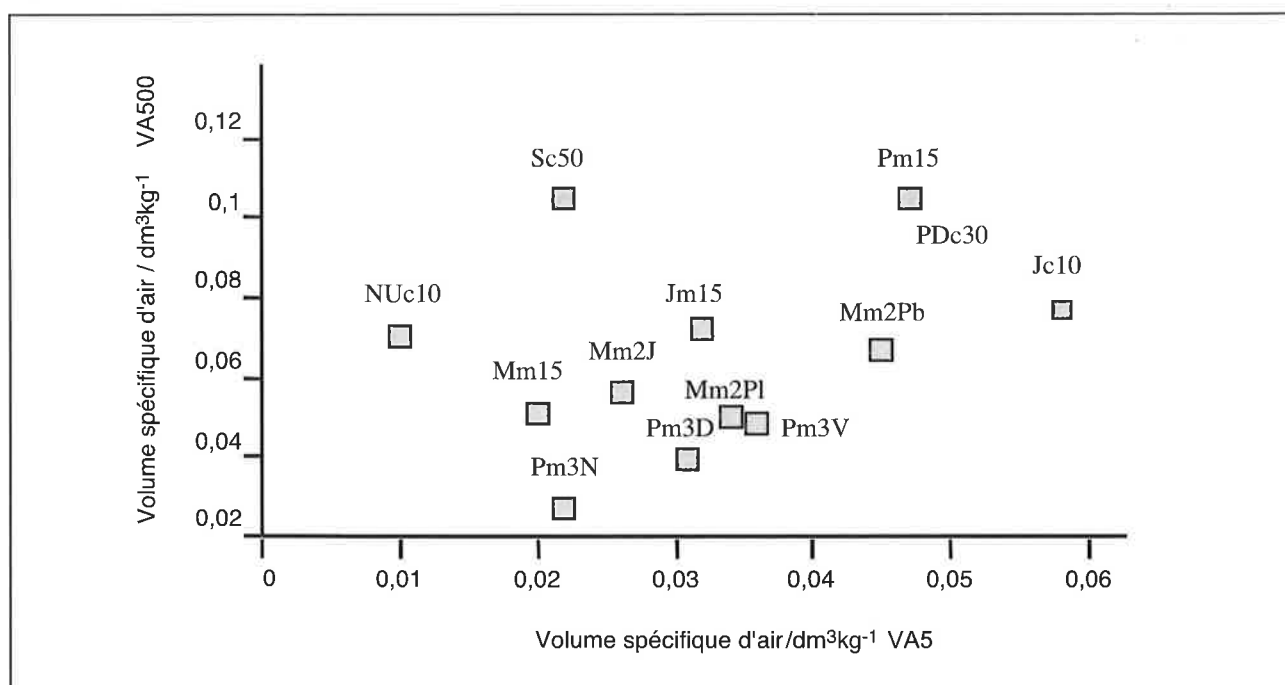
deur volumique (figure 8 et 9): $0,5 \text{ dm}^3$, représentatif de la porosité structurale totale intra-prismes, et 5 cm^3 , représentatif du volume observable après imprégnation sous le champ d'une loupe binoculaire. Une sélection des architectures de moulage des pores structuraux observées est regroupée dans la planche 1.

Vertisols calciques de la Guadeloupe

Sur petits volumes, on note une régression de la porosité structurale de la couche superficielle (figure 8) entre la prairie naturelle Jc10, la prairie artificielle PDc30, le sol travaillé de Sc50 (canne, 8 labours en 10 ans) et le sol nu NUc10 (30 labours en 10 ans). Il est clair que la multiplication des passages d'outils, dont plusieurs sont obligatoirement appliqués en conditions humides, provoque un pétrissage qui se traduit par une réduction de la porosité structurale intra-agrégat. Ainsi l'architecture spongi-forme, à méats irréguliers, cloisons gaufrées, et cylindres et filaments intra-agrégats de Jc10 0-10cm (pl. 1, h), dont l'abondance s'accroît rapidement avec la profondeur (pl. 1, b) s'oppose à l'architecture cellulaire à cloisons minces et lisses de Sc50 à la base de la couche travaillée (pl. 1, d), et de NUc10. Sur les gros volumes (figure 8), la porosité structurale mesurée montre une relative stabilité: le travail du sol, même intensif maintient dura-

Figure 8 - Comparaison des volumes spécifiques d'air structural des prismes sur gros volumes (VA500 = 300-700 cm^3 , mesure par ensachage) et sur petits volumes (VA5 = 5-7 cm^3 , mesure au pétrole) durant le retrait normal. Echantillons non remaniés des situations Guadeloupe et Martinique, 0-10 cm. Les codes sont décrits dans la légende de la figure 2.

Figure 8 - Comparison of the specific structural air volumes of prisms, measured on big (V500 = 300 to 700 cm^3) and small (V5 = 5 to 7 cm^3) samples during normal shrinkage. Undisturbed samples of Guadeloupe and Martinique Vertisols, 0-10 cm layer. The codes are explained in the legend of figure 2.



blement des espaces inter-agrégats qui ne régressent pas. La disparition de porosité intra-agrégat est compensée par une augmentation de la porosité inter-agrégat.

On notera la convergence entre les deux dernières situations : bien qu'espacées de 5 à 7 ans, les séquences de travaux du sol répétées appliquées à la canne à sucre ont sensiblement le même effet que le même nombre de passages espacés d'outils sur un sol désherbé. La porosité structurale intra-agrégat n'est pas restaurée par l'activité biologique en fond de couche travaillée, malgré la pérennité d'une graminée présente depuis 4 ans. La densité de vers de terre y demeure très faible, tout comme la teneur en carbone et l'abondance des micro-agrégats à débris organiques figurés et bactériens, dont les valeurs sont proches de celles obtenues sous NUC10 (Blanchart *et al.*, ce numéro).

Un autre fait remarquable concerne les différences entre prairie artificielle et jachère spontanée. La tendance à un volume poral structural plus faible sur les petits volumes en 0-10 cm de PCc30 par rapport à Jc10 (*figure 8*) s'accroît entre 10 et 20 cm : $0,035 \pm 0,007 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ contre $0,050 \pm 0,007 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$. Cette différence est par ailleurs nettement visible sur les profils obtenus sur gros volumes (*figure 9*) : la prairie artificielle montre des valeurs plus basses dans les 40 premiers centimètres, puis les valeurs augmentent pour rejoindre les profils de volume poral structural observés quels que soient les modes d'usage. Les architectures des moulages de pores sont très différentes : cellulaire à cloisons gaufrées pour PCc30 (*pl. 1, g*) avec quelques rares voiles et écailles intra-agrégats, spongiforme à tignasse intra-agrégat pour Jc10 (*pl. 1, b*). La densité de vers est nettement supérieure dans la première situation (Blanchart *et al.*, ce numéro) ; leur activité, intense dans cet horizon contenant par ailleurs plus de 60 g kg^{-1} de carbone, est la seule explication possible de la faiblesse de la porosité intra-agrégat. Les agrégats sont tous dérivés récemment de turricules, apparemment injectés dans le moindre espace disponible. Ensuite, soit l'intervalle entre deux ingestions est insuffisant pour autoriser une porogénèse tubulaire fine par les actinomycètes, soit l'abondance du carbone et la régularisation des conditions hydriques font que ces derniers régressent au profit de bactéries non filamenteuses. La première hypothèse est plus probable, car d'une part le bilan fait sur les dernières années montre que l'irrigation était rationnée, voire discontinue, d'autre part les agrégats organo-minéraux à débris organiques, plus accessibles aux bactéries filamenteuses, sont exceptionnellement abondants ; par ailleurs les filaments sont très représentés dès 50 cm de profondeur (*pl. 1, a*).

Les horizons profonds, en dessous de 20 à 40 cm selon les situations, montrent quant à eux une architecture en tignasse prédominante, présente quelles que soient les situations. Deux explications sont possibles :

- soit l'activité porogénétique tubulaire (racines, actinomycètes), fortement affectée en surface par le mode d'usage, demeure en profondeur,

- soit l'héritage d'une activité porogénétique, antérieure aux diversifications d'usage, est durable, grâce à la stabilité des argiles calciques.

La deuxième hypothèse pourrait être étayée par l'abondance des filaments sous le sol maintenu nu et travaillé depuis 10 ans, car il est difficile d'imaginer une porogénèse par des actinomycètes alors que le stock de carbone des couches de surface a fortement baissé, que les agrégats organo-minéraux sans élément organique figuré sont devenus largement prédominants (Blanchart *et al.*, ce numéro), et que les restitutions organiques sont quasi-nulles. Cependant, on peut inverser le propos en considérant que cette baisse du stock de carbone et la disparition des éléments figurés est forcément à imputer à une activité biologique, et que la durée a été insuffisante pour arrêter la porogénèse. Nous en resterons donc au constat de l'importance et de la stabilité des architectures à filaments, imputée aux actinomycètes, dans les horizons profonds. Une activité fongique, voire mycorhizienne, non étudiées ici, pourrait du reste avoir le même résultat en termes de porogénèse tubulaire fine et stable. Le facteur prédominant du développement en profondeur des pores tubulaires fins est l'aération : les situations à tendance hydromorphe, à horizon (B) bariolé gris et rouge montrent un volume de porosité structurale tubulaire significativement restreint par rapport aux situations de Vertisols sains à horizon (B) jaune (*figure 9*).

Vertisols à garniture plus magnésio-sodique de la Martinique

La diminution de la porosité structurale évaluée sur petits volumes sous l'effet du travail du sol est tout aussi nette de PDm10 (prairie artificielle) à Mm2Pb et Mm2PI (prairie mise en maraîchage, respectivement avec 1 bêchage mécanique et 3 labours / an), puis Mm15 (30 labours sur 15 ans). La cause en est la même : le pétrissage sous l'outil provoque une réduction de la porosité intra-agrégat, d'autant plus importante que le nombre de passages, et donc le risque de plasticité excessive du sol lors des passages, augmentent. Les architectures des moulages observés dans les couches fortement travaillées (*pl. 1, f*) sont cellulaires larges, avec des cloisons minces et lisses, les agrégats ne contiennent que des écailles espacées et fines, et quelques rares tubes. Comme à la Guadeloupe, mais plus rares, les filaments sont présents sous la couche travaillée. Sous prairie artificielle, au contraire, on observe en surface une extrême abondance de tubes et cylindres de taille moyenne en tignasse grossière, mais sans pour autant que n'apparaissent d'architecture spongiforme ni de filament intra-agrégat ; les galeries de vers sont nombreuses, en relation avec une densité de vers élevée. Bien que la teneur en carbone soit moindre qu'à la Guadeloupe, le pétrissage par les vers est manifeste. À partir de 20 cm, les filaments sont présents, mais localisés au contact de galeries de vers, parfois en tignasses foliacées au contact de cylindres d'anciens passages racinaires (*pl. 1, c*). Il

Figure 9 - Profils de volume de porosité structurale intra-prisme sur cinq situations de Vertisols calciques de la Guadeloupe, estimée par le volume spécifique d'air (échantillons de 200 à 500 cm³).

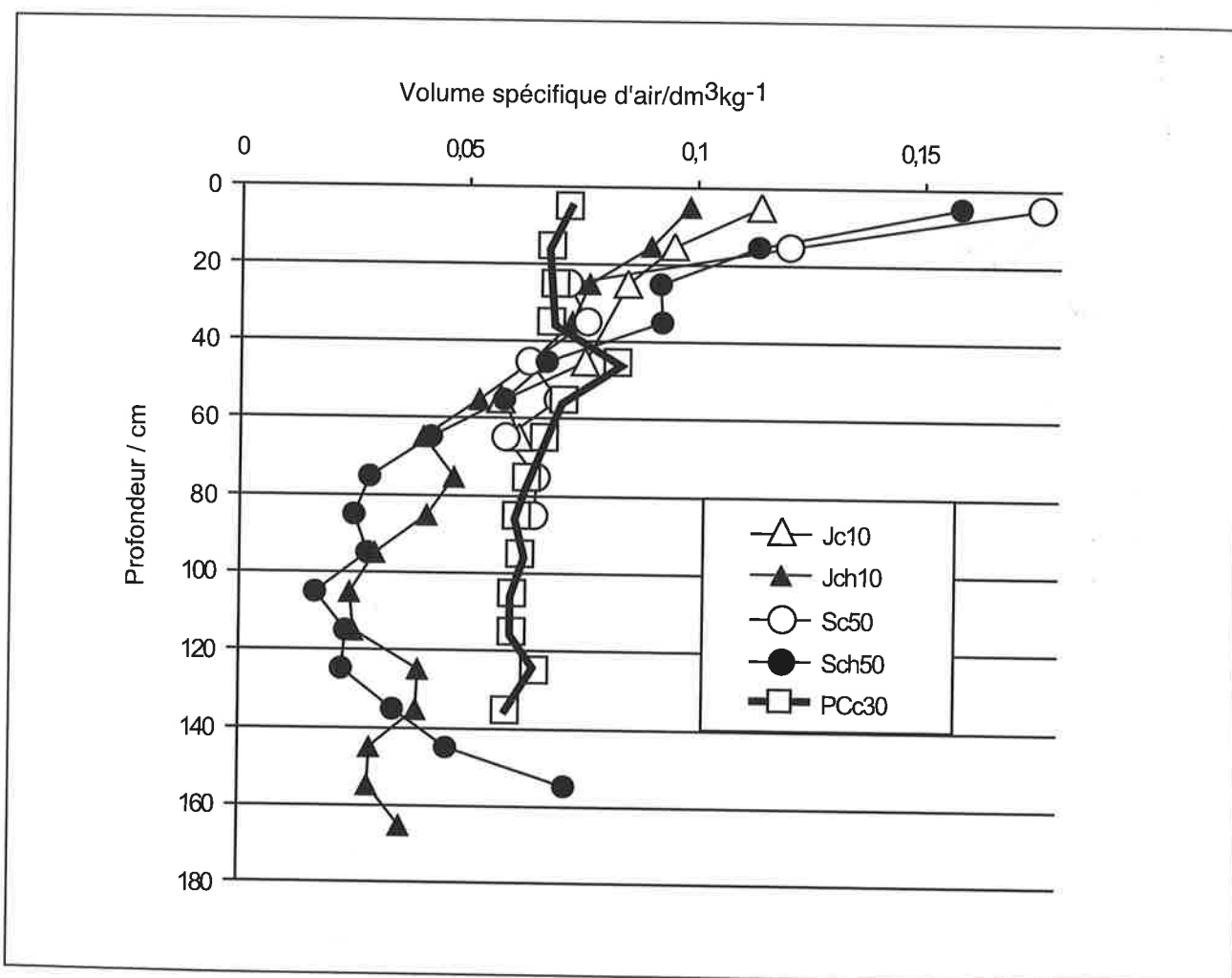
Vertisol à horizon brun-jaune en dessous de 60 cm : PCc30, prairie artificielle fertilisée et irriguée de Cynodon depuis plus de 30 ans ; Sc50, canne-à-sucre depuis plus de 50 ans, 10 mois après les derniers labours ; Jc10, Jachère spontanée à *Dichantium aristatum* depuis plus de 10 ans.

Vertisol à horizon gris bariolé de rouge en dessous de 60 cm : Sch50, canne-à-sucre depuis plus de 50 ans, 33 mois après labours ; Jch10, Jachère spontanée à *Dichantium aristatum* depuis plus de 10 ans.

Figure 9 - Vertical distribution of intra-prism structural pore volumes on five sites of calcic Vertisols in Guadeloupe, measured as air specific volume (200 to 500 cm³ samples).

Vertisol with a brown-yellow layer below 60 cm : PCc30, fertilised and irrigated Cynodon grassland since more than 30 years ; Sc50, under sugarcane since more than 50 years, 10 months after the last tillage ; Jc10, *Dichantium aristatum* grass fallow since more than 10 years.

Vertisol with a grey and red layer below 60 cm : Sch50, under sugarcane since more than 50 years, 33 months after the last tillage ; Jch10, *Dichantium aristatum* grass fallow since more than 10 years.



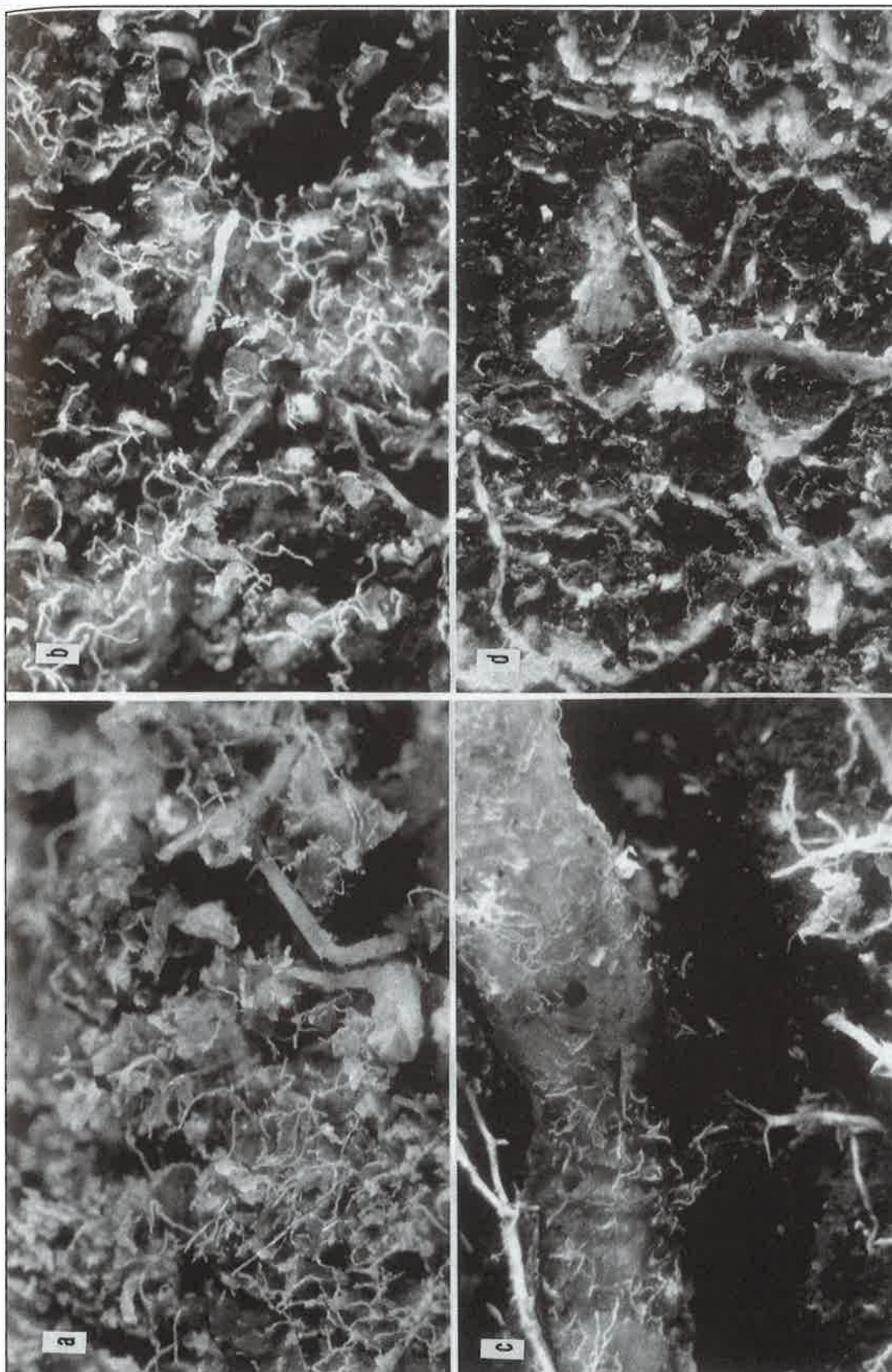


Planche 1 - Moulages des pores structuraux par de la résine fluorescente aux UVA, vus après décapage partiel de l'argile.

a: PCc30 50-60 cm x12; b: Jc10 20-30 cm x12; c: PDm17 30-40 cm x6; d: Sc50 20-30 cm x6. La longueur de chaque photo représente 15 mm pour "x6" et 7,5 mm pour "x12".

Planche 1 - Structural pore casts using UVA fluorescent resin; view after partial removing of the clay matrix

a: PCc30 50-60 cm x12; b: Jc10 20-30 cm x12; c: PDm17 30-40 cm x6; d: Sc50 20-30 cm x6. The length of each picture represents 15 mm for "x6" and 7,5 mm for "x12".

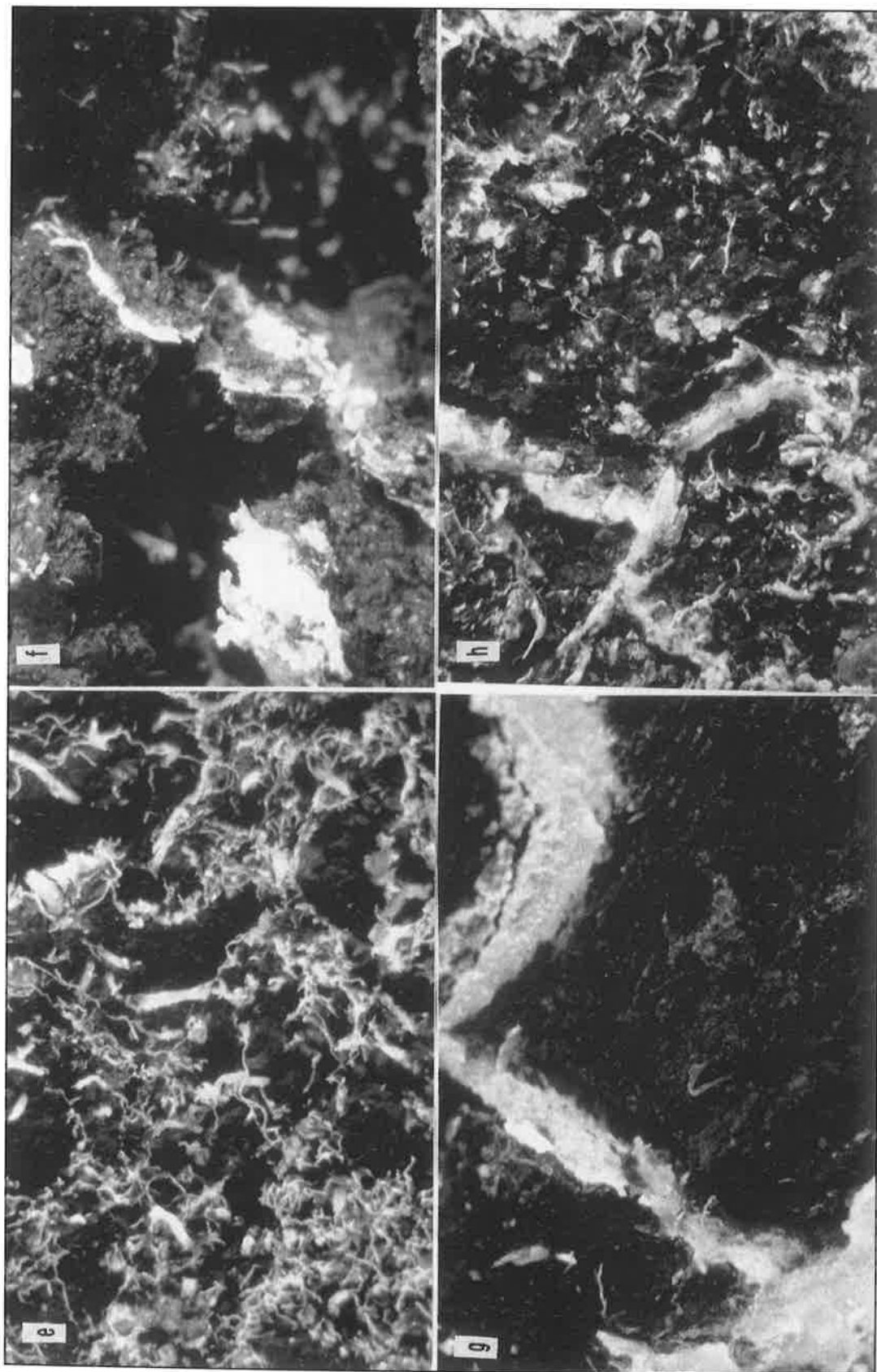


Planche 1 - Moulages des pores structuraux par de la résine fluorescente aux UVA, vus après décapage partiel de l'argile.

e: NUc10 20-30 cm x6; f: Mm15 10-20 cm x6; g: PCc30 5-15 cm x6; h: Jc10 0-10 cm x6. La longueur de chaque photo représente 15 mm pour "x6" et 7,5 mm pour "x12".

Planche 1 - Structural pore casts using UVA fluorescent resin; view after partial removing of the clay matrix

e: NUc10 20-30 cm x6; f: Mm15 10-20 cm x6; g: PCc30 5-15 cm x6; h: Jc10 0-10 cm x6. The length of each picture represents 15 mm for "x6" and 7,5 mm for "x12".

est possible que l'instabilité des argiles magnésio-sodiques et l'irrigation discontinue par aspersion induisent des bouchages ou des discontinuités qui couperaient ce réseau des transferts structuraux, tant d'eau que de résine lors de l'imprégnation.

Sur ces Vertisols magnésio-sodiques, on note une régression de porosité structurale également sur les gros volumes (figure 8): les espaces inter-agrégats créés par le travail du sol sont donc rapidement affectés, par la déformabilité des agrégats, à cause de la moindre cohésion des argiles magnésio-sodiques, et par le colmatage inter-agrégat, conséquence de la forte détachabilité superficielle et de la dispersabilité des argiles (Blanchart *et al.*, ce numéro).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les principaux résultats permettent de porter un diagnostic sur la disponibilité de l'eau des Vertisols et son origine dans les différents systèmes de porosité, pour différents modes d'usage. Ces derniers contrôlent différents niveaux d'activité biologique créatrice de porosité structurale. Un organigramme de ce diagnostic est proposé dans la figure 10.

La notion de disponibilité de l'eau pour les plantes est bien sûr contingente du système sol-plante: même si la conductivité hydraulique est faible, une plante à enracinement dense pourra sans stress exploiter une grande partie du réservoir matriciel; c'est le cas du *Dichanthium aristatum*, graminée spontanée des "savanes" des Antilles. Les considérations sur la disponibilité de l'eau ont donc été discutées dans l'hypothèse d'un enracinement peu dense, celui d'une plante en début d'installation, ou d'une plante maraîchère comme la tomate ou le melon: avec un tel enracinement, seule la consommation de l'eau structurale permet de satisfaire les besoins en eau, tandis que celle de l'eau matricielle provoque un stress précoce.

L'accès à l'eau de la porosité matricielle est principalement limité par la faible conductivité hydraulique, que le statut organique ou la micro-agrégation autour d'éléments organiques figurés ne semblent pas en mesure d'augmenter significativement.

L'ouverture de la porosité macro-fissurale est commandée par la perte d'eau de l'eau matricielle, extraite par les racines. Elle ne contribue pas au réservoir d'eau disponible des Vertisols, son remplissage fugace est suivi d'un transfert vers la porosité matricielle dont le volume s'accroît et provoque le gonflement des bordures des prismes. En revanche, elle permet une aération profonde, et représente une sécurité par rapport au risque de saturation des horizons superficiels. Une bonne gestion de l'eau s'accompagnera donc d'un rationnement permettant une légère consommation de l'eau matricielle en profondeur, lorsque la plante est bien installée.

La porosité structurale intra-prisme a été l'objet essentiel de cette étude, qui apporte des connaissances nouvelles sur la

contribution de l'activité microbiologique des Vertisols à la création de pores cylindriques, hélicoïdaux, fins (10 à 30 μm) et interconnectés, dont les premiers tests laissent présumer qu'ils sont créés par les actinomycètes. C'est sous les jachères herbacées que ces pores sont les plus développés. Dans les couches de surface, ils sont présents à l'intérieur des agrégats, eux-mêmes séparés par des méats polyconcaves étroits et des pores plans aux parois granuleuses. Toutes ces formes sont stables, et maximisent le réservoir d'eau structural, sa disponibilité et sa disjonction fonctionnelle du réservoir d'eau matriciel. Ce système de porosité, dont nous avons qualifié le moulage de spongiforme, est altéré par les travaux du sol répétés, même si ce n'est que tous les cinq à six ans dans le cas de la culture de la canne à sucre. Il est remplacé par un système de méats polyédriques ou polyconvexes et par des formes planes à parois lisses manifestement micro-fissurales, peu susceptibles de retenir de l'eau structurale. Ces formes planes attestent du départ précoce de l'eau matricielle, et autorisent une réhumectation matricielle par l'espace disponible pour le regonflement. L'interdépendance entre porosités structurale et matricielle est forte, en même temps que les stress sont rapides car la part de consommation matricielle devient vite prédominante. Cet effet est plus fort sur les Vertisols magnésio-sodiques que sur les Vertisols calciques: ces derniers sont plus cohérents à une teneur en eau donnée que les premiers, et donc moins sensibles au pétrissage, par ailleurs ils ne sont pas sujets à la dispersion des argiles et aux colmatages qu'elle peut entraîner.

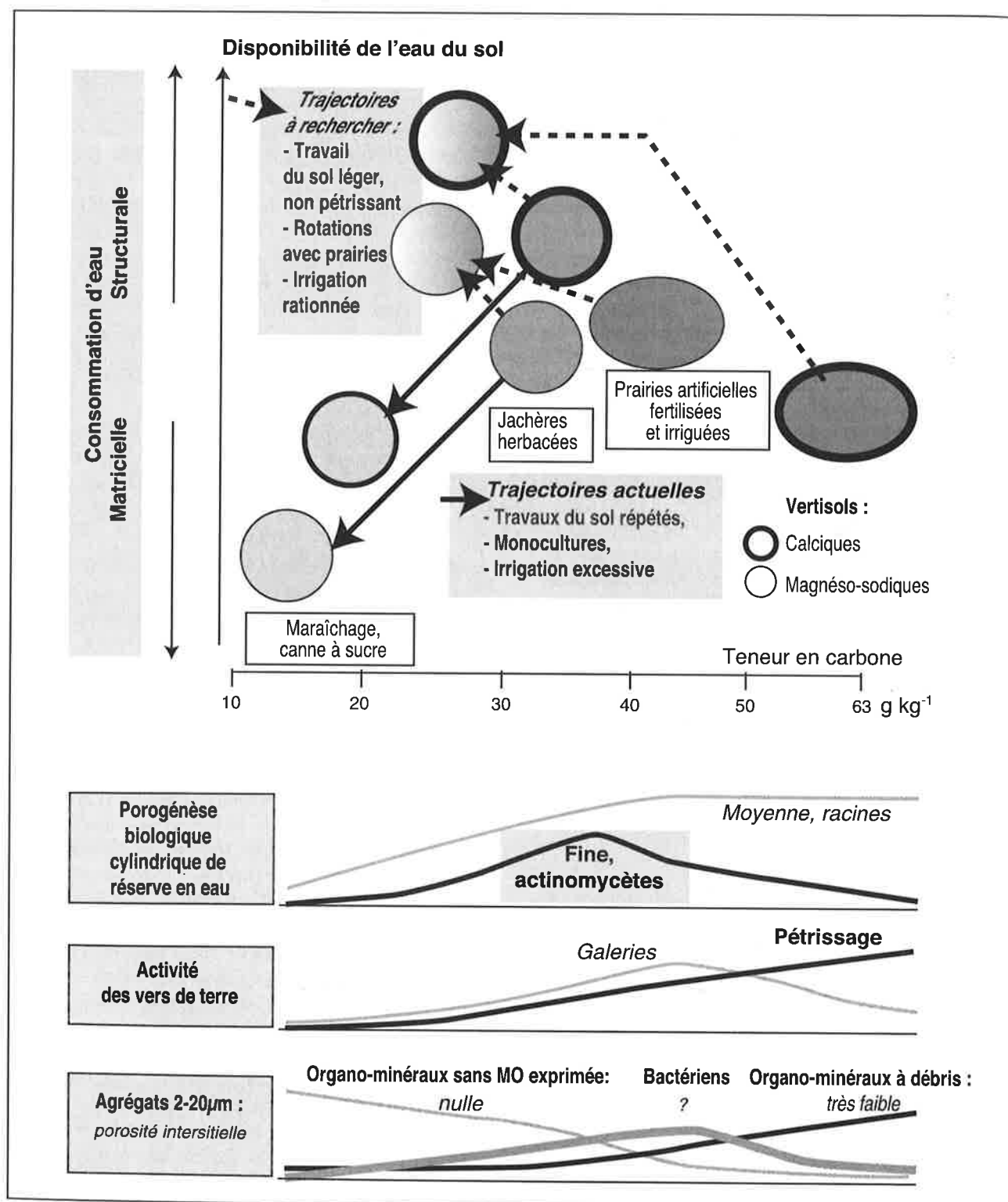
Sous prairies artificielles fertilisées, le stock organique du sol est beaucoup plus élevé, le sol n'est pas travaillé, il est plus ou moins régulièrement irrigué en période ou saison sèche. Les biomasses et densités de vers de terre sont plus élevées (Blanchart *et al.*, ce numéro); mais surtout leur activité, attestée par l'abondance des agrégats dérivés de turricules, est apparemment d'autant plus forte que la teneur en carbone est élevée, et que le régime hydrique est régularisé par l'irrigation. Il s'ensuit un pétrissage fréquent des couches de surface, dont la porosité cylindrique fine intra-agrégat disparaît lors du transit dans le tube digestif des vers. Bien que les actinomycètes soient présents puisque les systèmes de pores en tignasses sont présents dans les horizons profonds, ils n'ont pas le temps de reformer des pores intra-agrégats (ou sont moins actifs) entre deux ingestions. La disponibilité de l'eau est donc affectée par l'activité intense des vers de terre.

Dans l'état actuel de ces conclusions, trois recommandations sont à faire:

- diminuer le nombre de passages d'outils de travail du sol, préférer ceux qui travaillent à l'arrachement à ceux qui pétrissent, mais surtout diminuer la profondeur de travail, d'autant plus que le sol est humide;
- introduire des rotations comportant une sole herbacée, pluviale ou d'irrigation discontinue;

Figure 10 - Etats et trajectoires de la disponibilité de l'eau des couches superficielles des Vertisols des Antilles, sous différents modes d'usage, en relation avec la teneur en carbone; intervention des principaux agents biologiques créateurs de porosité structurale.

Figure 10 - Levels and evolution of the water supply to plants in the upper layer of Antilles Vertisols, under the different land use, related to organic carbon content; role of the main biota in building the structural porosity.



- maîtriser l'irrigation : toute irrigation excessive provoque un gonflement des agrégats, et donc leur coalescence, voire leur auto-pétrissage, et empêche par ailleurs le développement des racines et de l'activité microbiologique qui leur est associée, ainsi que la création de galeries de vers de terre vers leurs loges de quiescence en profondeur.

Ces deux derniers points appellent de nouveaux champs de recherche : cette étude a mis l'accent sur deux groupes de microbiontes dont l'effet porogénétique est respectivement probable, et possible : les actinomycètes, et les bactéries sécrétrices d'exopolysaccharides (EPS), dont l'espèce nouvelle *Bulkholderia caribensis* (Achouak *et al.*, 1999). Or ces deux groupes n'ont ni le même comportement trophique, ni la même capacité d'expression massale en fonction de l'état hydrique du milieu : les actinomycètes résistent mieux à la dissémination ou à l'incorporation des ressources carbonées dans la matrice, ainsi qu'à la dessiccation ; en revanche, ils ne résistent pas à la compétition des bactéries, qui se multiplient rapidement dans les milieux riches en glucides et de teneur en eau régulièrement élevée (Dommergues et Manganot, 1970). La gestion de la porogénèse microbiologique, par la manipulation de la restitution de carbone (successions culturales) et du régime hydrique (irrigation) est une voie à approfondir pour la gestion durable des Vertisols.

La difficile question de la modélisation des transferts d'eau dans les Vertisols trouve ici de nouveaux points d'ancrage :

- vu les dimensions très fines atteintes par les réseaux cylindriques interconnectés, une grande proportion de la porosité structurale fonctionne sous un schéma plutôt darcien que de type " macropores " ; on pourra ainsi modifier le modèle de Ruy *et al.* (1999), avec deux modèles darcien en parallèle, " structural ", et " matriciel " ;

- la hiérarchie forme-taille des pores structuraux explique la non unicité des paramètres de transfert dans les macropores en fonction de l'état initial (Ruy, 1997), en même temps que des facteurs de forme et de densité de pores peuvent être désormais introduits de manière déterministe, et non par calage.

En attendant ces progrès théoriques, ces résultats concourent à un affinement de l'avertissement à l'irrigation parcellaire par le système THERESA. On peut considérer la teneur en carbone comme un indicateur global assez robuste de l'état du système poral structural. Les sols ou très riches, ou pauvres en carbone, à assemblages cellulaires, toléreront un déclenchement de l'irrigation à une consommation matricielle apparente plus élevée, donc à un retrait vertical plus élevé, que les sols de teneur intermédiaire à assemblages spongieux et en tignasses. Ces derniers devront recevoir une irrigation dès le moindre retrait, vu la disjonction des phases structurale (sans stress) et matricielle (avec stress) de la consommation d'eau.

Enfin cette étude a été très orientée vers la disponibilité de l'eau. Un important travail reste à faire pour coupler celle-ci

avec la disponibilité de l'azote, en particulier face au besoin d'admettre une sollicitation matricielle si la forme ammonium, interagissant avec l'argile, est prédominante.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien financier (1996-99) de l'Action Incitative Interinstitutionnelle (AII) ORSTOM-CIRAD-CNRS-INRA : " Biofonctionnement des Sols tropicaux et Gestion Durable des terres ". L'équipe du projet P3-Antilles remercie chaleureusement l'ensemble des personnes sans qui les travaux de terrain et de laboratoire n'auraient pu se faire : INRA (Jacques André, Thierry Bajazet, Andève Mulciba), IRD (ex-ORSTOM) (Jérôme Bernard, Jean-Pierre Lamoureux, Joele Louri, Luc Rangon, Raymond Totila). Elle remercie aussi les directeurs des Domaines expérimentaux de l'INRA de Gardel (Jérôme Fleury) et Godet (Marceau Farant) à la Guadeloupe, ainsi que le Conseil Général de la Martinique, tutelle de la Station d'Essais en Cultures Irriguées (SECI), sur lesquels ont été sélectionnées les situations étudiées.

BIBLIOGRAPHIE

- Achouak W., Christen R., Barakat M., Martel M. H., Heulin T., 1999 - *Burkholderia caribensis* sp. nov., an exopolysaccharide-producing bacterium isolated from Vertisol micro-aggregates in Martinique. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 49, pp. 787-794.
- Blanchart E., Achouak W., Albrecht A., Barakat M., Bellier G., Cabidoche Y.-M., Hartmann C., Heulin T., Larré-Larrouy C., Laurent J.Y., Mahieu M., Thomas F., Villemin G., Watteau F., 1999 - Déterminants biologiques de l'agrégation dans les Vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur l'érodibilité. *Etude et Gestion des Sols*, Ce numéro.
- Cabidoche Y.-M., Guillaume P., 1998 - A casting method for the three-dimensional analysis of the intra-prism structural pores in Vertisols. *European Journal of Soil Science*, 49, pp. 187-196.
- Cabidoche Y.-M., Ney B., 1987 - Fonctionnement hydrique de sols à argiles gonflantes cultivés. II- Analyse expérimentale des fonctionnements hydriques associés à deux états structuraux en Vertisol irrigué. *Agronomie*, 7, 4, pp. 257-270.
- Cabidoche Y.-M., Ozier-Lafontaine H., 1995 - T.H.E.R.E.S.A. : I. Matric water content measurements through thickness variations in Vertisols. *Agricultural Water Management*, 28, pp. 133-147.
- Cabidoche Y.-M., Ruy S., 2001 - Field shrinkage curves of a swelling clay soil: analysis of multiple structural swelling and shrinkage phases in the prisms of a Vertisol. *Australian Journal of Soil Research*, 38, 5, sous presse.
- Cabidoche Y.-M., Voltz M., 1995 - Nonuniform volume and water content changes in swelling soils: II. A field study on Vertisols. *European Journal of Soil Science*, 46, pp. 345-355.
- Dommergues Y., Manganot F., 1970 - *Ecologie microbienne du sol*. Masson, Paris.
- Guillaume P., 1998 - Analyse tridimensionnelle directe de la porosité structurale de Vertisols. Relations entre formes, fonctionnement hydrique. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 168 p. + annexes.
- Haines W.B., 1923 - The volume-changes associated with variations of water-

- content in soil. *Journal of Agricultural Science*, 13, pp. 296-310.
- Jaillard B., Cabidoche Y.-M., 1984 - Dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant, I, Dynamique hydrique. *Science du Sol*, 3, pp. 239-251.
- Keen B.A., 1931 - The physical properties of the soil. Longmans, Green, and Co., London, U.K.
- Monnier G., Stengel P., Fiès J.-C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, 24, pp. 533-545.
- Ozier-Lafontaine H., Cabidoche Y.-M., 1995 - T.H.E.R.E.S.A.: II. Soil thickness variations as an indicator of soil and plant water status in Vertisols. *Agricultural Water Management*, 28, pp. 149-161.
- Ringrose-Voase A.J., 1987 - A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. *Journal of Soil Science*, 38, pp. 343-356.
- Ritchie J.T., Burnett E., 1971 - Dryland evaporative flux in sub-humid climate, II, Plant influences. *Agronomy Journal*, 63, pp. 56-61.
- Ruy S., 1997 - Les trois voies simultanées de l'infiltration dans un Vertisol de Gaudeloupe: étude expérimentale et numérique. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 243 p. + annexes.
- Ruy S., Cabidoche Y.-M., 1998 - Matric unsaturated conductivity of a Vertisol: a field and laboratory comparison. *European Journal of Soil Science*, 49, pp. 175-185.
- Ruy S., Di Pietro L., Cabidoche Y.-M., 1999 - Numerical modelling of water infiltration into the three components of porosity of a Vertisol from Guadeloupe. *Journal of Hydrology*, 221, pp. 1-19.
- Robert M., Hardy M., Elsass F., 1991 - Crystallochemistry, properties and organization of soil clays derived from major sedimentary rocks in France. *Clay Minerals*, 26, pp. 409-420.
- Sahimi M., 1995 - Flow and transport in porous media and fractured rock. VCH, 482 p.
- Stengel P., 1979 - Utilisation des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales Agronomiques*, 30 (1), 35-53.
- Stirk G.B., 1954 - Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 5, pp. 279-290.
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris VII, 361 p.
- Voltz M., Cabidoche Y.-M., 1995 - Nonuniform volume and water content changes in swelling soils: I. Theoretical analysis. *European Journal of Soil Science*, 46, pp. 333-343.